



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

**Estudo para otimização do sistema de isolamento
elétrico em motores de indução trifásicos de MT
– Estágio na Wegeuro - Indústria Elétrica, S.A.**

Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização em Automação e
Comunicações em Sistemas de Energia

Autor

Diamantino Alves Rito

Orientador

Doutor Paulo José Gameiro Pereirinha

Professor do Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor

Engenheiro José Pedro Lacerda Coimbra

Analista Técnico – Área Elétrica na Wegeuro, S.A.

Coimbra, Maio de 2018

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Pereirinha pela disponibilidade, apoio e dedicação durante a realização deste trabalho.

Ao meu supervisor, Engenheiro José Coimbra, por todo o apoio durante o estágio, pela disponibilidade e pelos ensinamentos que me transmitiu.

Ao Professor Doutor Fernando Simões e Professor Doutor Celestino Veiga, pela ajuda e apoio nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC.

À Wegeuro pela oportunidade de realizar o estágio, pelo companheirismo e por toda a experiência profissional transmitida.

Fica uma palavra de agradecimento a todos os que neste percurso de estudo e trabalho me auxiliaram e acompanharam.

RESUMO

No mercado atual, com clientes cada vez mais exigentes, é fundamental para uma empresa de sucesso acompanhar o desenvolvimento tecnológico, otimizar os sistemas e estar sempre um passo à frente em relação à concorrência. A estratégia é conseguir apresentar produtos mais compactos e eficientes, com qualidade e preços competitivos. Neste âmbito, a Wegeuro decidiu estudar a otimização do sistema de isolamento elétrico de bobinas em motores de indução trifásica de Média Tensão, dando origem a este estágio.

Este estudo foi desenvolvido em duas etapas. A primeira consistiu em estudar e avaliar a substituição do isolamento do fio retangular de cobre isolado de três para duas camadas de fita de mica, na bobinagem de motores de indução trifásicos de Média Tensão, definindo ensaios de validação baseados em normas internas da WEG, bem como em normas internacionais IEC. Neste relatório são descritos os procedimentos de ensaio, apresentando os resultados obtidos e as observações efetuados ao longo de todo o processo. Com esta avaliação pretendeu-se reduzir as dimensões do núcleo da bobina e posteriormente a inclusão de mais material ferromagnético e/ou cobre no motor, aumentando a eficiência e/ou a obtenção de mais potência para a mesma carcaça. A segunda etapa consistiu em avaliar e parametrizar o processo de prensagem térmica, utilizado na produção de bobinas de Média e Alta Tensão. Durante a realização deste estágio, como consequência e para aprofundamento do estudo efetuado, foi colocada em funcionamento uma nova prensa térmica, em que foram utilizados os fios retangulares de cobre estudados na primeira etapa. Foram também efetuados ensaios de prensagem de forma a validar as decisões tomadas e a otimizar o processo.

O desenvolvimento deste tema durante o estágio forneceu vantagens tanto para o processo de produção de bobinas como para o processo de prensagem a nível de dimensões, qualidade e fiabilidade do produto final.

Todos os sistemas desenvolvidos foram testados em ambiente industrial, sendo os resultados obtidos e as respetivas conclusões apresentados neste relatório.

Palavras-chave: Motores de indução trifásicos, Enrolamentos de máquinas elétricas, Prensagem térmica de bobinas, Ensaios de isolamento de fio retangular de cobre.

ABSTRACT

In the current market, with increasingly demanding customers, it is fundamental for a successful company to follow technological development, optimize systems and always be one step ahead of the competition. The strategy is to be able to present more compact and efficient products, with quality and competitive prices. In this context, Wegeuro decided to study the optimization of the electric insulation system of coils in three-phase induction motors of Medium Voltage, giving rise to this internship.

This study was developed in two stages. The first one consisted of studying and evaluating the substitution of the rectangular copper wire insulated with three layers of mica tape by a similar one insulated with two layers of mica tape. This is for application in motors windings, defining validation tests based on WEG internal standards as well as international standards IEC. This report describes the test procedures, presenting the results obtained and the observations made throughout the process. With this evaluation it was intended to reduce the dimensions of the core of the coil and later the inclusion of more ferromagnetic material and / or copper in the motor, increasing the efficiency and / or obtaining more power for the same motor frame. The second step consisted of evaluating and parameterizing the thermal press process used in the production of Medium and High Voltage coils. During this internship, as a consequence and to deepen the study carried out, a new thermal press was put into operation, in which the rectangular copper wires studied in the first stage were used. Thermal pressing tests were also carried out in order to validate the decisions made and to optimize the process.

The development of this theme during the internship provided advantages both for the production process of coils and for the process of pressing in terms of dimensions, quality and reliability of the final product.

All systems developed were tested in an industrial environment, with the results obtained and the respective conclusions presented in this report.

Keywords: Three-phase induction motors, Windings of electric machines, Coil Thermal Pressing, Insulation testing of rectangular copper wire.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO

1.1	MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO	1
1.2	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	1
1.3	OBJETIVOS DO ESTÁGIO	1
1.4	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	2

2 PROCESSO PRODUTIVO DE BOBINAS DE MT NA WEG

2.1	INTRODUÇÃO À NORMALIZAÇÃO	3
2.2	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	4
2.3	SISTEMA DE ISOLAMENTO DE UMA BOBINA.....	5
2.4	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	7
2.4.1	<i>Projeto do motor.....</i>	7
2.4.2	<i>Enrolar navete</i>	8
2.4.3	<i>Consolidação da navete</i>	9
2.4.4	<i>Prensagem térmica.....</i>	9
2.4.5	<i>Colocar fita de nastro.....</i>	9
2.4.6	<i>Expandir navete / formar bobina</i>	10
2.4.7	<i>Enfitamento do isolamento principal à máquina</i>	10
2.4.8	<i>Isolar pontas.....</i>	11
2.4.9	<i>Colocação da fita condutora.....</i>	11
2.4.10	<i>Enfitamento do isolamento principal à mão</i>	11
2.4.11	<i>Colocação de fita semi-condutora.....</i>	12
2.4.12	<i>Colocação da fita de acabamento</i>	12
2.5	ENSAIOS DE ROTINA NA LINHA DE PRODUÇÃO E CONTROLO DE QUALIDADE	12

3 SISTEMA DE ISOLAMENTO PROPOSTO A 2 CAMADAS DE FITA DE MICA

3.1	INTRODUÇÃO	15
3.2	NORMALIZAÇÃO	15
3.3	TIPO DE FIO EM ANÁLISE	15
3.4	CERTIFICADOS DE QUALIDADE	17
3.5	ENSAIOS REALIZADOS PARA VALIDAÇÃO.....	18
3.5.1	<i>Medição da resistência elétrica.....</i>	18
3.5.2	<i>Medição dimensional do FRC</i>	21
3.5.3	<i>Flexibilidade e aderência</i>	28
3.5.4	<i>Ensaio de rigidez dielétrica – Tensão de rutura a provetes.....</i>	32
3.6	BENEFÍCIOS ECONÓMICOS.....	38
3.7	CONCLUSÕES	40

4 ANÁLISE E MELHORIA DO PROCESSO DE PRENSAGEM TÉRMICA

4.1	INTRODUÇÃO	41
4.2	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS PRENSAS TÉRMICAS	41

4.3	NAVETES PARA TESTES DE PRENSAGEM	44
4.4	PREPARAR FERRAMENTAS DE PRENSAGEM.....	45
4.5	PROCESSOS DIFERENTES DE PRENSAGEM.....	47
4.5.1	<i>Processo 1</i>	48
4.5.2	<i>Processo 2</i>	49
4.5.3	<i>Processo 3</i>	49
4.5.4	<i>Processo 4</i>	49
4.5.5	<i>Processo 5</i>	49
4.5.6	<i>Processo 6</i>	50
4.6	RESULTADOS	50
4.6.1	<i>Comparação de processos</i>	50
4.6.2	<i>Comparação de FRC isolado a 2 e a 3 camadas</i>	51
4.6.3	<i>Comparação de prensas</i>	52
4.6.4	<i>Verificação da temperatura nas navetes</i>	53
4.7	ENSAIO DE RIGIDEZ DIELETRICA ENTRE ESPIRAS	56
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	
5.1	CONCLUSÕES	59
5.2	TRABALHO FUTURO	59

BIBLIOGRAFIA

ANEXO A – FICHA TÉCNICA – CONDUCTOFOL 2009

ANEXO B – GUIA DE ENSAIOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diferentes níveis de Normalização (Almacinha, 2013)	3
Figura 2.2. Esquema de um motor de indução trifásico W22 (Catálogo WEG, 2014)	5
Figura 2.3. Esquema de desfasamento a 50%	6
Figura 2.4. Esquema de sobreposição a 50%	6
Figura 2.5. Sistema de isolamento em motores de MT e AT (Rodrigues, 2010)	6
Figura 2.6. Disposição de espiras em bobinas com FRC	8
Figura 2.7. Esquema de colocação em "Dente de cão"	9
Figura 2.8. Navete com fita de nastro.....	10
Figura 2.9. Bobina formada.....	10
Figura 2.10. Esquema de enfitamento à máquina para 6,6 kV	11
Figura 2.11. Ponta de ligação completamente isolada	11
Figura 2.12. Bobina depois de colocar fita condutora.....	11
Figura 2.13. Bobina depois de isolar as partes curvas.....	12
Figura 2.14. Acabamento da bobina [WPS-22502 PT]	12
Figura 2.15. Conjunto de bobinas em fim de linha	12
Figura 2.16. Medidor de ângulo de abertura de bobinas	13
Figura 3.1. Resumo do FRC disponível para ensaios.....	16
Figura 3.2. Condutividade elétrica das diferentes FRC.....	20
Figura 3.3. Provetes com isolamento utilizados para medição com micrómetro	21
Figura 3.4. Provetes sem isolamento utilizados para medição com micrómetro	21
Figura 3.5. Proвете Fornecedor A - 2 camadas	27
Figura 3.6. Exemplo da linha de contorno e indicação dos raios do boleado.	27
Figura 3.7. Desenho da ferramenta de curvar.....	30
Figura 3.8. Ferramenta de curvar.....	30
Figura 3.9. Sentido Largura – Fornecedor A - 4,50 x 2,50 – 2 camadas.....	30
Figura 3.10. Sentido Largura – Fornecedor B - 4,50 x 3,15 - 2 camadas.....	31
Figura 3.11. Sentido Espessura – Fornecedor A - 4,50 x 2,50 - 2 camadas	31
Figura 3.12. Sentido Espessura – Fornecedor B - 4,50 x 2,50 - 2 camadas	32
Figura 3.13. Sentido Espessura – Fornecedor C - 4,50 x 3,15 - 4 camadas	32
Figura 3.14. Equipamento de ensaio de rigidez dielétrica.....	33

Figura 3.15. Gráfico da granulometria da granalha de aço	33
Figura 3.16. Ligação do provete ao aparelho de ensaio de rigidez dielétrica	34
Figura 3.17. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,24 para testes.....	35
Figura 3.18. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,50 para testes.....	35
Figura 3.19. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 3,15 para testes.....	36
Figura 3.20. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,24 - 3 camadas	37
Figura 3.21. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,50 - 3 camadas	37
Figura 3.22. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 3,15 - 3 camadas	38
Figura 4.1. Etapas de funcionamento da prensa antiga.....	43
Figura 4.2. Etapas de funcionamento da prensa nova.....	43
Figura 4.3. Recorte do plano de bobinagem- Dimensões da navete (em mm)	44
Figura 4.4. Recorte do plano de bobinagem - Dimensões da bobina no estator	44
Figura 4.5. Pontos de medição dos testes de prensagem	45
Figura 4.6. Apresentação da folha de cálculo de controlo de prensagem	45
Figura 4.7. Esquematização das réguas da prensa antiga	46
Figura 4.8. Esquematização das réguas da prensa nova	46
Figura 4.9. Exemplo de novo objetivo de prensagem de navetes - 2 camadas de isolamento.	47
Figura 4.10. Exemplo de novo objetivo de prensagem de navetes - 3 camadas de isolamento	47
Figura 4.11. Exemplo de dois problemas verificados no processo 1 de prensagem.....	49
Figura 4.12. Exemplo do problema verificado no processo 5 de prensagem	50
Figura 4.13. Exemplo de uma boa conformação de navete usando o processo 6.....	50
Figura 4.14. Comparação de linearidade das navetes	52
Figura 4.15. Corte efetuado nas navetes para colocação das PT100	53
Figura 4.16. Colocação das navetes com duas PT100 na prensa nova	54
Figura 4.17. Curvas de temperatura relativa ao processo 6	55
Figura 4.18. Curvas de temperatura relativa ao reajuste final do processo	55
Figura 4.19. Preparação da navete para ensaio de rigidez dielétrica entre espiras	56
Figura 4.20. Preparação da bobina para ensaio de rigidez dielétrica entre espiras.....	56
Figura 4.21. Indicação das espiras para ensaio de rigidez dielétrica	57
Figura 4.22. Exemplo de invalidação de resultados.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Gammas de motores MT mais produzidos na Wegeuro. Imagens de (Catálogo WEG, 2014).....	4
Tabela 3.1. Descrição resumida dos documentos de inspeção previstos na norma EN 10204:2004 (APTA - Associação de Produtores de Tubos de Aço, s.d.)	17
Tabela 3.2. Equipamento de medição utilizado no ensaio de resistência elétrica	18
Tabela 3.3. Valores máximos da resistência elétrica do FRC perante a norma IEC 60317-0-2	18
Tabela 3.4. Resistência elétrica dos diferentes FRC	19
Tabela 3.5- Equipamento de medição utilizado no ensaio dimensional.....	21
Tabela 3.6. Resultados dimensionais do FRC (dimensões em mm)	22
Tabela 3.7. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 2,14 mm	23
Tabela 3.8. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 2,50 mm	24
Tabela 3.9. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 3,15 mm	25
Tabela 3.10. Resultados - Raios dos boleados.....	28
Tabela 3.11. Diâmetro de pinos para ensaio de flexibilidade e aderência à T. ambiente.....	29
Tabela 3.12. Consumos de 3 medidas de FRC - ano 2016 e 2017	38
Tabela 3.13. Cotações e benefícios económicos para 3 medidas de FRC.....	39
Tabela 3.14. Benefício económico para todas as medidas de FRC	39
Tabela 4.1. Características principais das prensas.....	42
Tabela 4.2. Parâmetros de teste de diferentes processos de prensagem	48
Tabela 4.3. Sequência de navetes nos diversos processos.....	48
Tabela 4.4. Percentagens de redução dos 6 processos.....	51
Tabela 4.5. Diferença entre o processo 3 e 4	51
Tabela 4.6. Resultados de comparação das duas prensas	52
Tabela 4.7. Cálculo de tempo de produção - exemplo para 48 bobinas	53
Tabela 4.8. Resultados de rigidez dielétrica entre espiras	58

Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas

MT – Media Tensão

AT – Alta Tensão

AC – *Alternating Current* (Corrente Alternada)

RMS – *Root Mean Square* (Valor Eficaz)

FRC – Fio Retangular de Cobre

VPI – *Vacuum Pressure Impregnation* (Impregnação por Vácuo)

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

WPS-XXXX PT – Norma interna WEG - Código de referência - Idioma Português

f – frequência elétrica

L – Indutância

C – Capacitância

Certif. – Certificado

Medic. – Medição

T – Temperatura

t - tempo

Y – Ligação estrela

2P – 2 Polos

1 Introdução

1.1 Motivação e Enquadramento

O mercado tem vindo a exigir motores cada vez mais eficientes e mais compactos. Em vários domínios tem-se vindo a apostar em investigação e desenvolvimento, tanto a nível mecânico como elétrico.

A principal motivação para realizar este estágio foi a junção da componente teórica e de pesquisa com a aplicação prática. Neste foi possível estudar e conhecer de perto o processo fabril de um motor de indução trifásico de Média Tensão (MT), lidar com problemas reais em campo, realizar os ensaios experimentais e laboratoriais propostos, com o objetivo de alterar o produto e trazer benefícios à empresa.

1.2 Apresentação da Empresa

A WEG é uma empresa nascida no Brasil, que foi crescendo e internacionalizando-se para mercados da América e da Europa. Atualmente encontra-se presente em mais de 126 países, com destaque para a Argentina, Colômbia, México, Estados Unidos da América e Alemanha.

Em Portugal, com a designação Wegeuro, implantou-se em 2002 com uma unidade industrial na Maia e mais recentemente, em 2017, com uma nova unidade em Santo Tirso. Esta empresa conta com cerca de 450 colaboradores e o volume de negócio tem vindo a aumentar de ano para ano, tendo atingido no ano 2017, o valor de 41,9 milhões de euros. A Wegeuro é considerada uma referência nacional na área de motores elétricos, automação, quadros elétricos e tintas. A sua gama de motores antideflagrantes, desenvolvidos na fábrica da Maia, constitui um dos mais importantes segmentos de mercado, tendo aplicações para a Indústria de Óleo & Gás, Químicos & Petroquímicos e Minas.

O sucesso da WEG vem do seu investimento na área da investigação e da aposta na formação do seu capital humano. Com estes pilares e uma relação próxima com os seus clientes, procura responder aos desafios e estar na vanguarda da tecnologia. Tirando partido do seu posicionamento num grupo internacional, com acesso à informação técnica relevante, a Wegeuro mantém uma estrutura de negócio simples, fazendo controlo de todo o processo produtivo, o que lhe permite ser flexível, diversificada e rápida na sua resposta.

A sua eficiência é tanto a nível produtivo como ambiental, procurando continuamente ser mais ecoeficiente, com medidas de prevenção ambiental, produção e comercialização de produtos energeticamente mais eficientes.

1.3 Objetivos do Estágio

Para além das atividades operacionais da empresa, o principal objetivo deste estágio curricular foi o estudo da otimização do sistema de isolamento dos motores de indução trifásicos de Média Tensão ($\leq 6,6$ kV). Este estudo consiste principalmente na redução de dimensões do núcleo das bobinas estatóricas, substituindo o atual fio de cobre retangular a 3 camadas de fita de mica para 2 camadas, sem pôr em causa a capacidade mínima de isolamento. Para tal, será feita uma

caracterização de normas e ensaios aplicáveis, bem como um estudo de viabilidade económica dessa substituição.

Também faz parte do estudo a parametrização do processo de prensagem e entrada em funcionamento de uma nova prensa térmica de bobinas, incluindo uma definição por via teórica e prática dos limites mecânicos a definir para a operação de prensagem térmica. Será apresentada uma comparação entre as duas prensas e uma prototipagem em bobinas de diferentes processos, validando assim o mais vantajoso.

Este estágio irá servir como base a um estudo posterior, que terá por objetivo reduzir o isolamento principal da bobina, permitindo a inclusão de mais material ferromagnético no núcleo e/ou cobre nos enrolamentos, criando a possibilidade de diminuição das perdas no ferro e/ou do cobre, aumento do rendimento ou construir motores com maior densidade de potência na mesma carcaça.

1.4 Organização do Relatório

Este relatório de estágio está dividido em cinco capítulos, tal como se sintetiza de seguida:

- O Capítulo 1 contém a introdução ao projeto associado ao estágio, a sua contextualização, os objetivos, as metas a atingir e a organização do documento;
- O Capítulo 2 apresenta algumas definições bem como alguns conceitos de introdução e desenvolvimento aos capítulos principais (capítulos 3 e 4) deste relatório. Contém a descrição do processo produtivo de bobinas de motores de indução trifásicos de MT, descrevendo o sistema de isolamento da WEG.
- O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da avaliação da substituição do atual fio de cobre retangular isolado a três camadas de fita de mica para o equivalente a duas camadas. Serão indicados os diferentes tipos de fio de cobre isolados a utilizar na prototipagem. Para este estudo foram consultadas normas internacionais bem como normas internas da WEG, para assim definir os ensaios a realizar. Serão apresentados alguns desafios encontrados durante todo o processo, a sua solução e propostas para futuros ensaios.
- O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da aplicação da nova prensa térmica de bobinas. Serão indicados os objetivos e a importância de um correto processo de prensagem, incluindo os riscos associados. Será apresentada a descrição dos ensaios realizados de validação e parametrização da prensagem térmica. Com base na recolha de toda a informação deste capítulo, foi ainda elaborada internamente na empresa uma norma técnica de utilização da nova prensa.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros;
- O final deste Relatório de Estágio inclui as referências bibliográficas e os vários anexos mencionados ao longo dos capítulos anteriores.

2 Processo produtivo de bobinas de MT na WEG

2.1 Introdução à Normalização

A atividade normativa em domínios específicos teve o seu início nas empresas tecnologicamente mais evoluídas estendendo-se seguidamente aos correspondentes sectores de atividade. Mais tarde adquiriu um carácter nacional e com o incremento de comércio mundial surgiu a necessidade da existência de normalização de âmbito internacional (Almacinha, 2013). De acordo com o seu campo de aplicação (ver Figura 2.1), as normas podem designar-se como:

- Normas de empresa: normas estabelecidas ao nível de uma unidade industrial (exemplos: normas Renault, Efacec, WEG, Valvo, etc.)
- Normas de indústria: normas estabelecidas ao nível de um setor ou ramo industrial (exemplos: normas CNOMO, ASME, ASTM, etc.)
- Normas nacionais: normas estabelecidas para todo o país, por um organismo nacional de normalização (exemplos: normas NP, DIN, BS, ANSI, NBR, etc.)
- Normas regionais: normas adotadas por uma organização regional de normalização, ou, em certos casos, especificação técnica adotada por um organismo regional com funções de normalização (exemplos: normas EN, ETS, NEMA, etc.)
- Normas internacionais: normas adotadas por uma organização internacional de normalização, ou, em certos casos, especificação técnica adotada por um organismo internacional com funções de normalização (exemplos: normas ISO, IEC, etc.)



Figura 2.1. Diferentes níveis de Normalização (Almacinha, 2013)

Presentemente, o avanço da liberalização do comércio mundial e a interligação dos vários sectores industriais levaram a uma inversão no sentido do desenvolvimento da atividade normativa, nos domínios de interesse geral. Assim, os trabalhos de normalização, sobre assuntos de interesse mundial são, normalmente, desenvolvidas sob a direção da Organização Internacional de Normalização (ISO) e, quando apresentam interesse para a normalização europeia, são acompanhados no seio do Comité Europeu de Normalização (CEN). As normas elaboradas a este nível são, posteriormente, adotadas como normas nacionais, pelo respetivos Organismos Nacionais de Normalização (ONN) e, finalmente, consagradas no procedimento interno dos diferentes sectores industriais e empresariais (Almacinha, 2013).

2.2 Motores de Indução trifásicos

O motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando - com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos.

As gamas de motores elétricos mais produzidos na Wegeuro a nível de MT são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Gamas de motores MT mais produzidos na Wegeuro. Imagens de (Catálogo WEG, 2014)

 <p>W22 Potência: até 400 kW Carcaça: 315 a 355 mm Polaridade: 2 a 8 polos</p>	 <p>W22Xd Potência: até 1400 kW Carcaça: 315 a 500 mm Polaridade: 2 a 8 polos</p>	 <p>W22XdT Potência: até 2000 kW Carcaça: 560 a 630 mm Polaridade: 2 a 6 polos</p>
 <p>W50 Potência: até 1100 kW Carcaça: 315 a 450 mm Polaridade: 2 a 12 polos</p>	 <p>HGF Potência: até 1400 kW Carcaça: 315 a 630 mm Polaridade: 2 a 10 polos</p>	

A Wegeuro tem vindo a produzir motores com maiores alturas de eixo, maior potência e ou com um número maior de polos, aumentando assim as gamas e oferta de mercado.

É considerada uma atmosfera explosiva quando existe em contato com o oxigênio uma proporção tal de gás, vapor, poeira ou fibras, em que uma faísca proveniente de um circuito elétrico ou o aquecimento de um equipamento pode ser fonte de ignição e provocar uma explosão.

A gama de motores antideflagrantes desenvolvidos na fábrica da Maia constitui um importante portfólio da WEG para os segmentos de mercado envolvendo áreas perigosas.

A gama de motores da série W22X desenvolvidos, projetados e fabricados segundo as mais recentes normas internacionais oferecem a possibilidade de uma aplicação global cobrindo todo o tipo de aplicações em áreas perigosas. São produtos de elevada fiabilidade e segurança oferecendo baixos custos de manutenção, baixo consumo energético e baixas temperaturas de funcionamento.

É representada na Figura 2.2 a desagregação dos diferentes componentes de um motor, dos quais será abordado o sistema de isolamento da bobinagem do estator na secção seguinte.

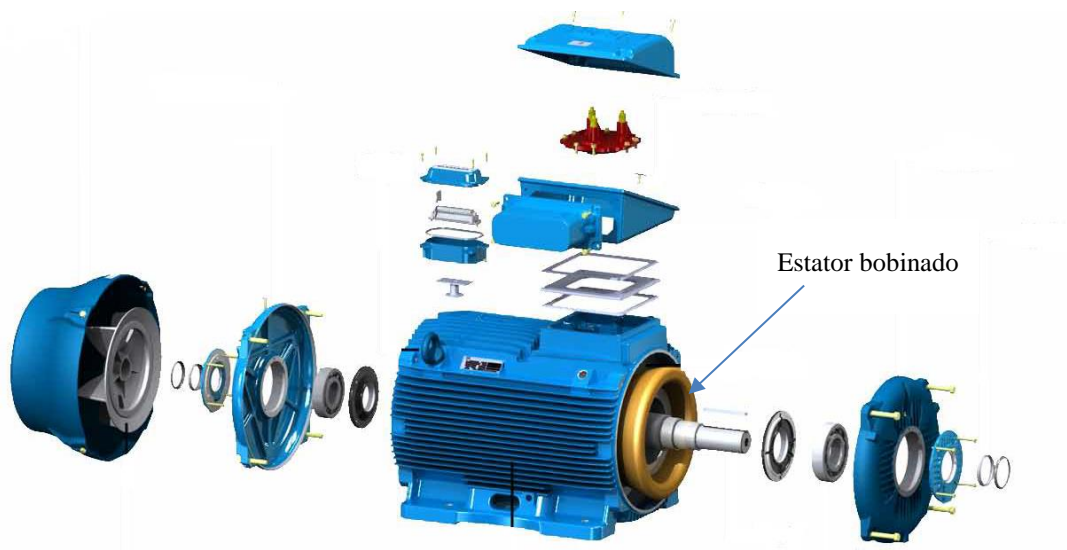


Figura 2.2. Esquema de um motor de indução trifásico W22 (Catálogo WEG, 2014)

2.3 Sistema de isolamento de uma bobina

O sistema de isolamento é definido em função da temperatura de funcionamento, a tensão nominal da máquina, a resina utilizada na impregnação, e ainda o ambiente em que o motor irá operar. A vida útil do isolamento é influenciada pelo seu envelhecimento gradual, que vai perdendo as suas características isolantes, ao ponto de não suportar a tensão aplicada e originar um curto-circuito. Pela lei de Arrhenius sabe-se que um aumento de 8 a 10 °C acima do limite da classe térmica de um isolante pode reduzir a metade a vida útil do isolamento da bobina (Rodrigues, 2010).

O sistema de isolamento divide-se em quatro subsistemas de isolamento, nomeadamente: isolamento entre espiras, isolamento principal, proteção contra efeito coroa, e isolamento das conexões.

O isolamento entre espiras é responsável por isolar eletricamente as diferentes espiras da bobina fazendo com que a corrente circule pela bobina criando um campo magnético resultante do número total de espiras em série. Problemas ou falhas no isolamento originam curto-circuitos entre espiras e podem levar à falha permanente do motor.

É frequente utilizar, por parte dos fabricantes de cobre como isolamento no condutor, esmalte, fita de mica, a combinação de ambos ou Kapton.

Relativamente ao isolamento com fita de mica, o mesmo poderá ter várias camadas apresentando também diferentes processos de enfitamento. No caso de desfasamento (Figura 2.3), a primeira fita é enrolada topo a topo, não se sobrepondo a si mesma. A segunda fita sobrepõe a primeira no entanto desfasada de 50%, resultando assim em 2 camadas de isolamento de mica. No caso do esquema de sobreposição (Figura 2.4), uma fita de mica é enrolada no fio de cobre de forma a se sobrepor em 50%, resultando assim duas camadas de isolamento com uma fita de mica.

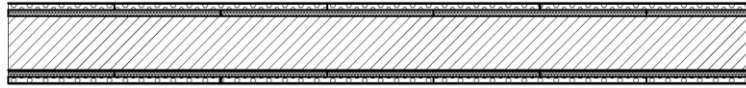


Figura 2.3. Esquema de desfasamento a 50%

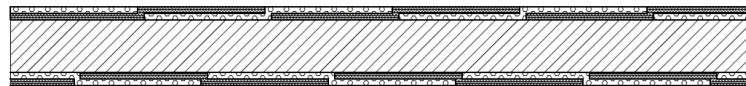
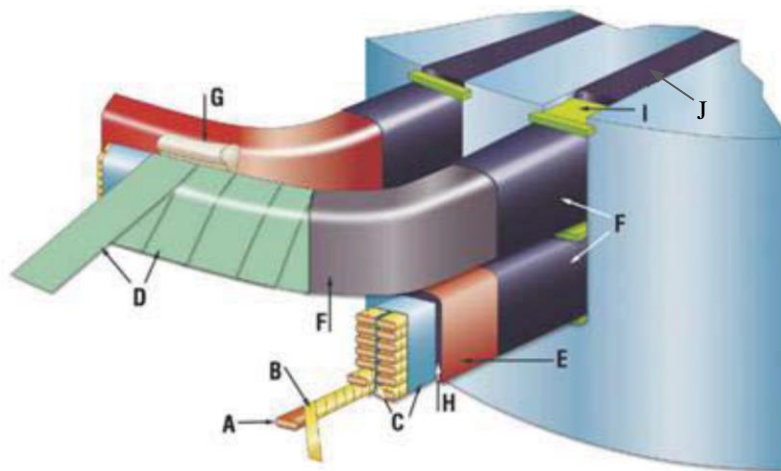


Figura 2.4. Esquema de sobreposição a 50%

O isolamento à massa é responsável por isolar eletricamente o núcleo da bobinagem relativamente à parte metálica do motor, estator, carcaça, etc, bem como das bobinas adjacentes. São usados vários materiais, como ilustrado na Figura 2.5 com características diferentes, tendo cada um a sua função específica.



Legenda	A Fio retangular de cobre nu ou esmaltado	F Fita condutora
	B Isolante do condutor	G Material de amarração
	C Material de consolidação da espira	H Resina de impregnação
	D Isolamento principal da bobina	I Material de preenchimento da ranhura
	E Fita de acabamento e proteção mecânica da bobina	J Reglete de fecho

Figura 2.5. Sistema de isolamento em motores de MT e AT (Rodrigues, 2010)

Para o isolamento principal da bobina é utilizada fita porosa à base de mica, em que o número de camadas é determinado pela tensão nominal do motor, de forma a garantir a rigidez dielétrica necessária.

Relativamente às conexões, todas são isoladas com a mesma fita e número de camadas conforme projeto para ser garantida capacidade de isolamento em todos os pontos do estator bobinado.

A fita, condutora ou semi-condutora, tem a função de proteção contra o que usualmente se designa por efeito coroa¹. A fita condutora é aplicada na parte reta da bobina com a função de evitar as descargas provocadas pela ranhura do estator. Quanto à fita semi-condutora, esta é aplicada nas extremidades das partes retas, ou seja, imediatamente na primeira curvatura à saída do estator. Ela é responsável pela equalização do gradiente do potencial elétrico nas extremidades do pacote do estator. (Rodrigues, 2010)

A fita de acabamento oferece proteção mecânica às testas das bobinas.

É importante de referir que todos os materiais isolantes utilizados são porosos e absorventes, para que no processo em que o estator é mergulhado no tanque de resina com ciclos de vácuo e pressão, a resina penetre até ao núcleo eliminando todos os espaços vazios e bolhas de ar. Este sistema de impregnação é designado por “Vacuum Pressure Impregnation” (VPI).

2.4 Descrição do processo

Neste subcapítulo é apresentada uma descrição de cada etapa de produção de uma bobina de MT, começando pelo projeto do motor e terminando na inspeção final da bobina.

2.4.1 Projeto do motor

É na fase do projeto que são calculados e determinados todos os parâmetros do motor. Os motores são projetados de forma a atender às especificações do cliente, apresentando requisitos especiais como relação de correntes, binários a atingir, proteções térmicas, certas características físicas tais como forma construtiva (se horizontal ou vertical), dimensões da máquina, caixas de ligações, pontos de fixação, grau de proteção IP e certificações do produto.

Para o Projeto Elétrico as características principais a ter em conta são a potência, binário, tensão aplicada ao motor, frequência de funcionamento, velocidade, rendimento e fator de potência exigido. Para que o motor atenda ao pedido do cliente, a bobinagem do motor é projetada definindo o seu passo, o número de espiras e a secção do fio de cobre a utilizar.

Todo este processo tem em conta a temperatura de funcionamento do motor, tanto para atender especificações dos materiais usados, como para cumprir as certificações do produto para áreas classificadas.

Todo o Projeto Elétrico é realizado em parceria com o Projeto Mecânico e a área de Certificação. Com toda a informação reunida é criada a lista técnica do motor. A área de Planeamento e Controlo de Produção emite as ordens de produção para a fábrica, das quais uma delas será a produção de bobinas. Toda a ordem de produção é analisada previamente pela área

¹ No entanto, segundo a definição do IEEE, este não seria o termo correto. De acordo com o IEEE Dictionary (IEEE Standart 100-1996), Coroa é uma forma de descarga parcial. O termo coroa é reservado para as descargas parciais visíveis que podem ocorrer em condutores de metal nu, que operam em alta tensão, ionizando o ar circundante. Como a descarga parcial dentro da parede do estator não é visível, não deve ser denominado efeito de coroa.

de Processos Industriais, em que no caso de produção de bobinas é analisado o tempo do processo bem como todos os materiais utilizados.

2.4.2 Enrolar navete

Numa fase inicial a bobina é designada por navete, pois ela possui no mesmo plano uma forma geométrica semelhante a uma união de dois arcos (Figura 2.8). É apenas após o processo de abertura/expansão em máquina hidráulica que a navete toma a sua forma geométrica final ganhando a designação de bobina (Figura 2.9).

Atualmente o fio de cobre utilizado é “Fio Retangular de Cobre”, FRC, isolado a 3 camadas de fita de mica, variando nas dimensões de largura e espessura geralmente de 4,00 x 1,00 mm até 9,00 x 3,55 mm. A disposição das espiras pode ser espiras simples, paralelas ou paralelas em série, conforme apresentado na Figura 2.6 em que os valores representam a numeração das espiras. Quando estas têm a mesma numeração, depois de ligadas as bobinas entre si, o respetivo conjunto de condutores corresponderá à mesma espira.

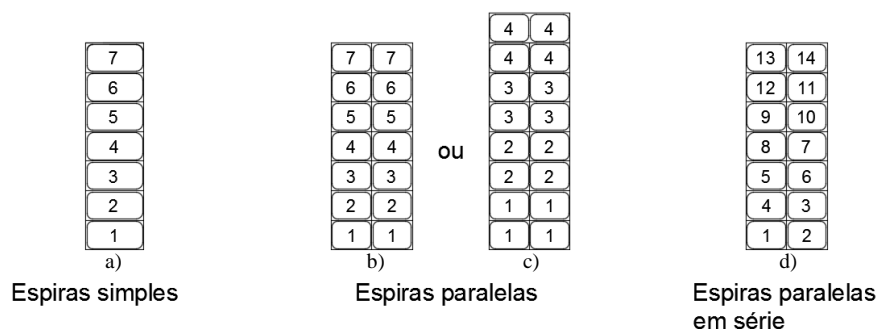


Figura 2.6. Disposição de espiras em bobinas com FRC

Descrição dos esquemas:

- Configuração de espiras simples: Esquema a um fio enrolado sobre si mesmo.
- Configuração de espiras paralelas: Conjunto de dois ou mais fios em largura ou altura, enrolados sobre si mesmos. Figura 2.6 b) esquema a dois fios, Figura 2.6 c) esquema a 4 fios.
- Configuração de espiras paralelas em série: Consiste em ter bobinas enrolada a um fio transposto lateralmente. Esquema utilizado apenas quando se necessita de muitas espiras e quando o espaço da ranhura é reduzido.

A grande vantagem do uso de fio de cobre retangular em relação ao fio de cobre circular é ter menos espaços vazios entre as espiras e com estas disposições de espiras consegue-se garantir uma distribuição uniforme das espiras, impedindo que no pior dos casos a primeira espira esteja próxima ou em contacto com a última. Assim sendo a tensão entre espiras de um motor em funcionamento é a tensão aplicada à bobina a dividir pelo número de espiras, equação (1).

$$\text{Tensão entre espiras} = \frac{\text{Tensão aplicada à bobina}}{\text{Número de espiras}} \quad (1)$$

O fio de cobre vem do fornecedor em carretas, que são colocadas com o apoio de uma mini grua nos desenroladores da máquina de enrolar navetes. Para preparar a máquina, o operário

tem de colocar os pinos indicados em projeto, ajustar a distância entre eles e programar o contador de voltas de acordo com a quantidade de espiras por navete.

No final de enrolar e antes de retirar a navete, o operário coloca uma fita de poliéster adesiva de modo a evitar que esta se deforme e/ou se desmolde. A fita adesiva é colocada em vários pontos, sendo que dois deles são nas extremidades e um a meio.

2.4.3 Consolidação da navete

Assim que termina o processo de enrolar, a navete é preparada na parte reta da bobina para a colocação de material consolidador. É utilizada uma fita flexível com 25 mm de largura, a qual é colocada manualmente em forma de “dente de cão” como esquematizado na Figura 2.7.



Figura 2.7. Esquema de colocação em "Dente de cão"

Esta fita tem a função de libertar o seu alto conteúdo de resina quando lhe é aplicado calor. Para evitar que a resina libertada pelo material consolidador se espalhe a outras navetes no processo de prensagem térmica (processo descrito já de seguida) ou à prensa, é aplicada uma película não aderente em volta das partes retas de cada navete.

2.4.4 Prensagem térmica

Para este processo utiliza-se uma prensa com resistências térmicas adequadas ao comprimento das réguas de prensagem. Das navetes apenas é prensada a área que contém material consolidador. A prensagem térmica tem duas grandes funções:

- Comprimir, reduzir e uniformizar as dimensões da navete na parte reta da bobina
- Consolidar e compactar as espiras

A prensa atual efetua em simultâneo uma prensagem vertical e horizontal. A prensa utiliza duas resistências de aquecimento, uma no topo e uma na base do eixo vertical.

Na preparação do processo de prensagem são colocadas na prensa as réguas definidas no projeto e ajustada a temperatura e tempo de prensagem. Dependendo das dimensões das navetes, são prensadas em cada ciclo de produção uma ou duas navetes de espiras paralelas ou até três navetes de espiras simples.

Ao retirar as navetes da prensa, estas são colocadas em cima de uma mesa preparada para o efeito, ficando assim a arrefecer até ser possível de novo o seu manuseamento. Após arrefecimento retira-se a película não aderente.

2.4.5 Colocar fita de nastro

A fita de nastro é colocada à semelhança da Figura 2.8. Esta fita tem a função de proteção mecânica da navete preparando-a assim para o processo de “expandir navete / formar bobina”.

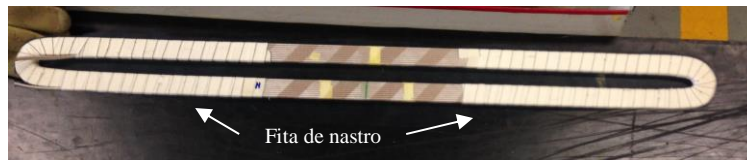


Figura 2.8. Navete com fita de nastro

2.4.6 Expandir navete / formar bobina

A máquina é programada com parâmetros especificados como ângulo de abertura, comprimento e altura da bobina, comprimento da parte reta, altura de eixo do motor e número de polos.

Com estes parâmetros introduzidos, a bobina é formada à semelhança da Figura 2.9 com a sua geometria final, apropriada para o motor projetado.



Figura 2.9. Bobina formada

Ao finalizar o processo, é removida a fita de nastro e são preparadas as pontas da bobina, decapando as extremidades e dobrando as pontas alinhando-as com a bobina.

2.4.7 Enfitamento do isolamento principal à máquina

Neste processo é colocado o isolamento principal da bobina na parte reta e em parte da desenvolvente, isolando-a eletricamente à massa. É importante verificar, antes do processo, se existem falhas no isolamento entre espiras, deformações ou algo que comprometa o bom isolamento da bobina.

Na preparação da máquina são programadas várias coordenadas, limites laterais e diferentes pontos nas curvas onde o movimento de translação do satélite e movimento girante é mais lento. Os limites laterais advêm do facto de que fisicamente não é possível a máquina enfitar a totalidade das testas da bobina. Para suavizar o isolamento de início e fim de curso, é programado um encurtamento (*shortning*) entre passagens formando uma “zona de degraus” conforme Figura 2.10. O número de passagens de isolamento depende da tensão nominal do motor.

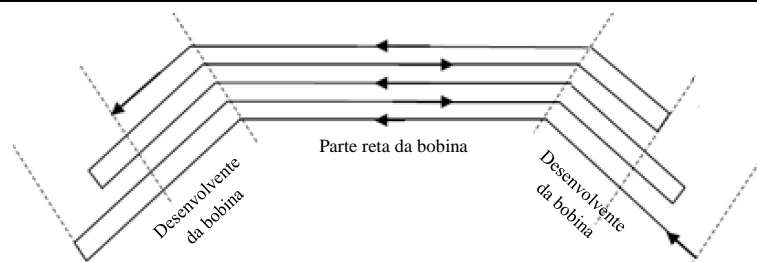


Figura 2.10. Esquema de enfitamento à máquina para 6,6 kV

2.4.8 Isolar pontas

Este processo é manual e consiste em isolar as pontas de ligação com o número de camadas definidas em projeto. Dá-se por concluído o processo de isolar pontas, uma vez que logo de seguida é dada uma passagem de fita de acabamento. O resultado final do isolamento de pontas está ilustrado na Figura 2.11.

2.4.9 Colocação da fita condutora

A fita condutora é aplicada manualmente na parte reta da bobina. O resultado do processo é ilustrado na Figura 2.12.



Figura 2.11. Ponta de ligação completamente isolada



Figura 2.12. Bobina depois de colocar fita condutora

2.4.10 Enfitamento do isolamento principal à mão

Dando continuidade ao enfitamento à máquina, o isolamento das partes curvas da bobina é efetuado manualmente. A “zona de degraus” permite uma transposição dos dois processos, uniforme, suave e sem deformação (ver Figura 2.13).



Figura 2.13. Bobina depois de isolar as partes curvas

2.4.11 Colocação de fita semi-condutora

Se especificado no projeto elétrico, é colocada uma fita semi-condutora. A fita é aplicada nas extremidades das partes retas e no início das desenvolventes, sobrepondo-se à fita condutora, conforme a Figura 2.14.

2.4.12 Colocação da fita de acabamento

A colocação desta fita inicia-se sobrepondo-se à semi-condutora e processa-se até ao lado oposto na bobina, conforme Figura 2.14. Este processo é o último da linha de produção de bobinas de MT. Na Figura 2.15, poderão ser visualizadas um conjunto de bobinas prontas as quais obrigatoriamente passam de seguida por um controlo de qualidade descrito no ponto 2.5.

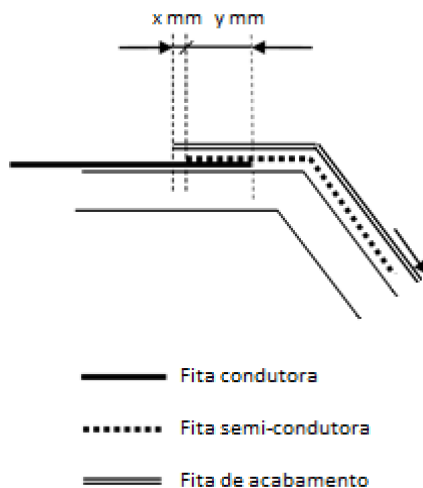


Figura 2.14. Acabamento da bobina
[WPS-22502 PT]



Figura 2.15. Conjunto de bobinas em fim de linha

2.5 Ensaios de rotina na linha de produção e controlo de qualidade

Durante todas as etapas de produção é importante a **inspeção visual** do produto, pois podem surgir pequenos danos ou anomalias nas bobinas que se detetadas a tempo podem ser facilmente solucionadas.

Em termos **dimensionais** é verificado o comprimento e altura bem como o ângulo de abertura das bobinas. É importante que todas as bobinas referentes a um motor sejam o mais idênticas possível, pois trata-se de uma produção em série. Se houver variações de dimensões ou geometria entre bobinas, as máquinas terão de ser reajustadas, perdendo tempo de produção e motivação por parte de quem as está a operar, diminuindo assim também o rendimento.

O **ângulo de abertura da bobina** é controlado com uma ferramenta ilustrada na Figura 2.16, constituída por uma guia ajustável e dois transferidores medindo assim o ângulo composto pelas duas partes da bobina.



Figura 2.16. Medidor de ângulo de abertura de bobinas

Este ângulo é importante pois as bobinas ao serem inseridas no estator, têm de estar radialmente alinhadas com as ranhuras do estator.

No fim do processo de produção de bobinas e antes de estas serem inseridas no estator, todas as bobinas passam por um **Ensaio de Onda Choque** (*Surge Test*), em que em função da tensão nominal do motor é aplicada um impulso com uma determinada amplitude. É registado em osciloscópio o comportamento de amortização ao longo das várias espiras da bobina e é guardada em memória no aparelho de medição, a forma de onda da primeira bobina a ser ensaiada.

A forma de onda apresentada está diretamente relacionada com a indutância da bobina. Um circuito típico é formado através da indutância da bobina (L) e da capacitância interna do equipamento. A indutância de uma bobina é basicamente determinada através do número de espiras, formato da espira e do núcleo da mesma. Quando a indutância diminui, a frequência da forma de onda aumentará de acordo com a equação (2). (Marcon)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

As formas de onda das bobinas seguintes são sobrepostas individualmente á primeira e comparadas. O esperado é todas as bobinas terem formas de onda idênticas à primeira.

O Ensaio de Onda Choque pode detetar um defeito entre espiras devido a um isolamento fragilizado. Quando o isolamento entre espiras é frágil, o resultado é uma pequena oscilação na amplitude, a forma de onda torna-se instável, pode mover-se rapidamente da direita para a esquerda e voltar para a posição original. Se o potencial aplicado for maior que a resistência do dielétrico do fio, o isolamento será rompido e as espiras estarão em curto-circuito, diminuindo

a indutância da bobina e conseqüentemente a frequência mudando assim a forma de onda em relação à original ou de referência.

A tensão ou amplitude da forma de onda é também alterada ou modificada devido a variação do valor da indutância proveniente de um incorreto número de espiras, por exemplo, uma falha na contagem do número de espiras no momento de enrolar a navete. Isto é determinado através da equação (3), onde a corrente (i) varia de acordo com o tempo do pulso (t).

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

No capítulo seguinte será feito o estudo da otimização do sistema de isolamento por forma a passar do FRC isolado com as atuais três camadas para duas camadas de fita de mica.

3 Sistema de isolamento proposto a 2 camadas de fita de mica

3.1 Introdução

Atualmente é utilizado na bobinagem de todos os motores de indução trifásicos de média tensão e Alta Tensão (AT), FRC isolado a 3 camadas de fita de mica. Considera-se para MT, motores alimentados com tensões desde 1,0 até 6,6 kV inclusive e para AT motores alimentados com tensões a partir de 6,6 até 13,8 kV inclusive.

O FRC isolado a 2 camadas de fita de mica pretende vir a substituir o atual a 3 camadas de fita de mica apenas para motores de MT, ou seja até 6,6 kV. As principais vantagens são:

- Redução de dimensão do núcleo da bobina, uma vez que em cada espira existe menos uma camada de mica. Quantas mais espiras tiver a bobina, mais significativa será a diferença.
- Questões económicas. O custo de aquisição do FRC isolado a 2 camadas de mica é menor que o equivalente a 3 camadas. É assim apresentado na secção 3.6 um estudo simples de viabilidade económica dessa substituição.

3.2 Normalização

Normas são acordos documentados, nas quais estão definidos critérios para produtos, serviços e métodos. Com auxílio das normas, pode-se garantir que os produtos e serviços sejam apropriados, comparáveis e compatíveis com a finalidade prevista. (PILZ - The Spirit of Safety, s.d.)

Para além das normas internas da WEG que são descritas ao longo deste relatório com WPS ou EDM, existem normas internacionais que definem processos e critérios das quais as principais são:

IEC 60034 - Rotating electrical machines

IEC 60317 - Specifications for particular types of winding wire

IEC 60554 - Specification for cellulosic papers for electrical purposes.

IEC 60851 – Methods of test for winding wires

3.3 Tipo de fio em análise

Em análise estão os três fabricantes/fornecedores de FRC, Fabricante A, B e C.

Para se poder comparar a situação pretendida com a atual foi adquirido FRC, tanto isolado a 2 como a 3 camadas de fita de mica a cada um dos 3 fabricantes.

Para FRC, a largura de 4,50 mm é a mais utilizada em motores de MT, pelo que se optou por fixar esse valor de referência e adquirir 3 espessuras diferentes, 2,24; 2,50 e 3,15 mm, isto porque o isolamento poderá ter comportamento diferente mediante a espessura do FRC. Na medida 4,50 x 2,24 mm o condutor terá uma proporção mais achatada, criando mais o efeito de “lâmina” no isolamento. Em contrapartida, na medida 4,50 x 3,15 mm o condutor já terá uma proporção mais quadrada. Para cada tipo de FRC foi adquirida a quantidade de 50 kg.

Resumindo na Figura 3.1 a informação mencionada, obtemos um total de 18 tipos de FRC diferentes em estudo, ou seja 18 carretas a 50 kg/cada, formando um total de 900 kg de FRC.

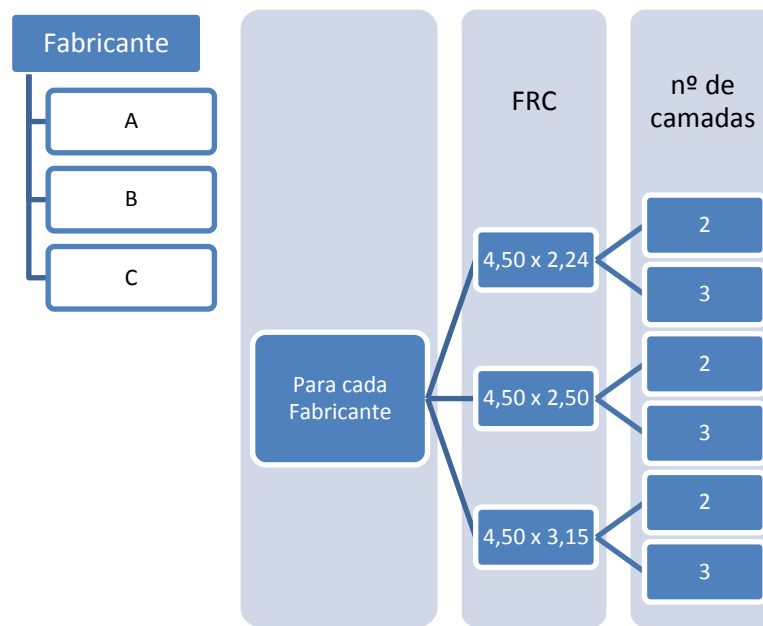


Figura 3.1. Resumo do FRC disponível para ensaios

O FRC isolado a 2 como a 3 camadas de fita de mica é fornecido com a mesma fita de isolamento a CONDUCTOFOL 2009 de 90 µm de espessura (ficha técnica disponível no anexo A). A forma de colocação da fita a 3 camadas é a mesma nos 3 diferentes fornecedores, 3 fitas com desfasamento de 33% entre camadas. No entanto no FRC isolado a 2 camadas, a forma de colocação da fita é diferente entre os 3 fornecedores. O FRC fornecido pelo fabricante:

- A é isolado por 2 fitas de mica desfasadas de 50% entre camadas.
- B é isolado por 1 fita de mica sobreposta a 50%
- C é isolado por 2 fitas sobrepostas a 50%

Surge assim a primeira não conformidade, o fornecedor C ao colocar 2 fitas de mica sobrepostas a 50 %, forma com isso 4 camadas de isolamento e não as pretendidas 2 camadas. O objetivo de reduzir uma camada de isolamento, passando das atuais 3 para 2 camadas, tendo com isso uma redução das dimensões do núcleo da bobina, não é cumprido, bem pelo contrário, representa o aumento de 1 camada perante a situação atual.


Este problema pode ter sido originado por vários motivos, por isso é de reforçar a importância de uma boa comunicação entre departamentos e perante o fornecedor no momento da compra. Muitas vezes surgem dúvidas quando se fala em número de fitas e número de camadas, o que é desfasamento e o que é sobreposição (a diferença de ambas as situações foi descrito no capítulo anterior (secção 2.3).

Portanto, no estudo de avaliação de isolamento a 2 camadas mantêm-se apenas os fornecedores A e B. Contudo, não será rejeitado o cobre do fornecedor C pois este poderá servir como comparação e determinação de um possível padrão entre 2, 3 e 4 camadas de isolamento.

3.4 Certificados de qualidade

Conforme a norma EN 10204 “*Metallic products – Types of inspection documents*” existem vários tipos de certificados de qualidade. Na Tabela 3.1 encontra-se resumida a descrição dos documentos de acordo com essa norma.

Tabela 3.1. Descrição resumida dos documentos de inspeção previstos na norma EN 10204:2004 (APTA - Associação de Produtores de Tubos de Aço, s.d.)

Ordem Crescente de Garantia ao Comprador	Referência normalizada do documento EN 10204	Designação do tipo de documento de inspeção	Tipo de inspeção	Conteúdo do documento de inspeção	Validação do documento de inspeção, efectuada pelo
	Tipo 2.1	Declaração de conformidade com a encomenda	Não específica	Declaração de conformidade com a encomenda, sem inclusão de resultados de ensaios	Produtor
	Tipo 2.2	Relatório de ensaio	Não específica	Declaração de conformidade com a encomenda, incluindo resultados de ensaios com base numa inspeção não específica	Produtor
	Tipo 3.1	Certificado de inspeção 3.1	Específica	Declaração de conformidade com a encomenda, incluindo resultados de ensaios com base numa inspeção específica	Representante da inspeção mandatado pelo produtor, hierarquicamente independente do departamento de produção.
	Tipo 3.2	Certificado de inspeção 3.2	Específica	Declaração de conformidade com a encomenda, incluindo resultados de ensaios com base numa inspeção específica	Representante da inspeção mandatado pelo produtor, hierarquicamente independente do departamento de produção e o representante da inspeção mandatado pelo comprador ou o inspetor designado pelos regulamentos oficiais.

Definições importantes:

Inspeção não específica: Inspeção efetuada pelo fabricante segundo os seus próprios procedimentos, com o fim de avaliar se os produtos definidos pela mesma especificação de produto e resultantes do mesmo processo de produção, satisfazem ou não os requisitos da encomenda. Os produtos inspecionados e ensaiados não são necessariamente os produtos que vão ser efetivamente fornecidos. (APTA - Associação de Produtores de Tubos de Aço, s.d.)

Inspeção específica: Inspeção efetuada antes do fornecimento, de acordo com a especificação de produto, sobre os produtos a serem fornecidos ou sobre unidades de ensaio² das quais os produtos a fornecer fazem parte, com o fim de avaliar se estes produtos satisfazem os requisitos da encomenda. (APTA - Associação de Produtores de Tubos de Aço, s.d.)

Os certificados fornecidos por parte dos fabricantes do FRC envolvidos neste estudo são do tipo 3.1. Contém informação como:

- Composição química do cobre;
- Características mecânicas: Dimensões do fio nu e isolado, resistência à tração, limite elástico, ângulo de retorno;
- Características elétricas: Resistência e/ou condutividade elétrica, tensão de rutura do isolamento.

² Definição de unidade de ensaio em conformidade com a Norma Europeia EN 10021: número de peças ou massa de produto a aceitar ou rejeitar em conjunto, com base nos ensaios a efetuar nos produtos/amostras de acordo com as especificações da norma do produto ou da encomenda.

3.5 Ensaios realizados para validação

Após uma pesquisa exaustiva de normas aplicáveis em que as principais estão referenciadas na secção 3.2 deste relatório, foi elaborado um “Guia de ensaios” (disponível no anexo B) que teve e tem como objetivo durante e após o estágio:

- Determinar os ensaios a realizar e a sua sequência;
- Indicar os equipamentos e suas características necessárias para realizar os ensaios;
- Descrever detalhadamente o procedimento do ensaio a realizar;
- Apresentar as tolerâncias dos resultados, e assim concluir se os valores dos ensaios estão dentro dos limites previstos;
- Elaboração de um documento técnico podendo regular ensaios em novos desenvolvimentos e verificações qualitativas de fio de cobre.

Alguns ensaios estão interligados, isto é, os dados ou resultados de uns ensaios são utilizados como parâmetros em outros ensaios. Por ex. na medição da resistência elétrica são utilizados os valores dimensionais do cobre para determinação das tolerâncias dos resultados e ainda para cálculo e comparação da condutividade elétrica entre tipo de FRC e fornecedores.

3.5.1 Medição da resistência elétrica

Procedimento de ensaio: Descrito na secção 3 do Guia de ensaios em anexo.

Equipamento utilizado: Foi utilizado para estas medições um microhmímetro digital, com resolução de $0,1 \mu\Omega$. Os ensaios foram efetuados em ambiente controlado e foi registada a temperatura variando esta entre 24,1 e 24,3 °C. Ambos os equipamentos (especificados na Tabela 3.2) encontram-se com a calibração válida.

Tabela 3.2. Equipamento de medição utilizado no ensaio de resistência elétrica

	Marca	Modelo	Calibrado a:	Calibrar em:
Microhmímetro	Raytech	Micro Junior 2	17-02-2017	--/02/2018
Termómetro	AMPROBE	TR300	13-02-2017	--/06/2020

Resultados:

Segundo a norma IEC 60317-0-2 a resistência do fio não deve ser maior que o valor calculado para a área de secção mínima permitida do condutor e uma resistividade do cobre de $1/58 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. A secção mínima do condutor é obtida usando como dimensões o limite inferior para a largura e espessura e o maior raio permitido do boleado. São assim determinados na Tabela 3.3 os valores máximos da Resistência por metro para as 3 medidas diferentes de FRC

Tabela 3.3. Valores máximos da resistência elétrica do FRC perante a norma IEC 60317-0-2

Dim. nom FRC [mm]	Largura min [mm]	Espessura min [mm]	Raio Boleado max. [mm]	Secção min [mm ²]	Resistência elétrica max. [mΩ/m]
4,50 x 2,24	4,45	2,21	0,813	9,268	1,860
4,50 x 2,50	4,45	2,47	1,000	10,133	1,701
4,50 x 3,15	4,45	3,12	1,000	13,026	1,324

São apresentados na Tabela 3.4 os valores das medições dos provetes bem como os valores de resistência elétrica equivalente a 1 m de fio de cobre à temperatura de 20 °C. Para a conversão foi utilizada a equação (4).

$$R_{20} = \frac{R_T}{3(1 + \alpha_{20}(T - 20))} \quad (4)$$

Em que: R_{20} é a Resistência equivalente a 1 m de cobre à temperatura de 20 °C

R_T é a Resistência medida à Temperatura de ensaio

α_{20} é o coeficiente térmico do cobre = $3,96 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

T é a Temperatura de ensaio

Tabela 3.4. Resistência elétrica dos diferentes FRC

FRC			Resistência elétrica [mΩ]	
Fabricante	Dim. nom.	nº de camadas	Medição efetuada	Conversão para 1m a 20 °C
A	4,50 x 2,24	2	5,307	1,740
A	4,50 x 2,24	3	5,430	1,780
B	4,50 x 2,24	2	5,354	1,755
B	4,50 x 2,24	3	5,320	1,773
C	4,50 x 2,24	4	5,320	1,744
C	4,50 x 2,24	3	5,364	1,759
A	4,50 x 2,50	2	4,866	1,595
A	4,50 x 2,50	3	4,880	1,600
B	4,50 x 2,50	2	4,886	1,602
B	4,50 x 2,50	3	4,786	1,569
C	4,50 x 2,50	4	4,837	1,586
C	4,50 x 2,50	3	4,820	1,580
A	4,50 x 3,15	2	3,851	1,263
A	4,50 x 3,15	3	3,884	1,273
B	4,50 x 3,15	2	3,757	1,232
B	4,50 x 3,15	3	3,753	1,231
C	4,50 x 3,15	4	3,797	1,245
C	4,50 x 3,15	3	3,781	1,240

A resistência elétrica (R) na equação (5), é inversamente proporcional à área da secção do cobre (A), daí que os valores medidos da resistência bem como os valores máximos permitidos são maiores para o FRC 4,50 x 2,24 e menores para o FRC 4,50 x 3,15.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (5)$$

Em que: ρ é a resistividade do material elétrico e l o comprimento do condutor.

Todos os resultados da Resistência a 20 °C demonstrados na Tabela 3.4 estão a verde, não excedendo portanto os valores máximos da resistência elétrica. Assim dá-se por aprovado este ensaio.

Cuidados que foram tidos em conta durante este ensaio:

Correta identificação dos provetes.

Manuseamento cuidado dos provetes, isto porque depois deste ensaio, estes provetes foram aproveitados para corte de novos provetes mais curtos que servirão no ensaio de verificação dimensional e nos ensaios de flexibilidade e aderência.

Colocação de tempo suficiente dos provetes e do equipamento de medição no mesmo ambiente onde será feito o ensaio de maneira que ambos estejam à temperatura correta de ensaio que é entre 15 a 25 °C.

Cortar exatamente todos os provetes com o mesmo comprimento, de maneira a que os resultados dos diferentes tipos de fio não sejam influenciados por terem diferentes comprimentos. O comprimento do provete é de 3,04 m, em que são decapados em ambas extremidades 2 cm de isolamento para colocação das pinças do aparelho de medição.

Cálculo da condutividade elétrica

Não ficando limitado apenas ao procedimento do ensaio de resistência elétrica e de forma a ser possível comparar qualitativamente o cobre entre os fornecedores, calculou-se a partir da resistência a condutividade elétrica de cada amostra (valores apresentados na Figura 3.2). Para tal, foi necessário calcular primeiro a secção do FRC (usando dados obtidos do “Ensaio de verificação dimensional do FRC”) e a partir da equação 5 deduziu-se a resistividade elétrica. Uma vez que esta é o inverso da condutividade elétrica facilmente se obtiveram os correspondentes valores expressos em S/m (*siemens por metro*).

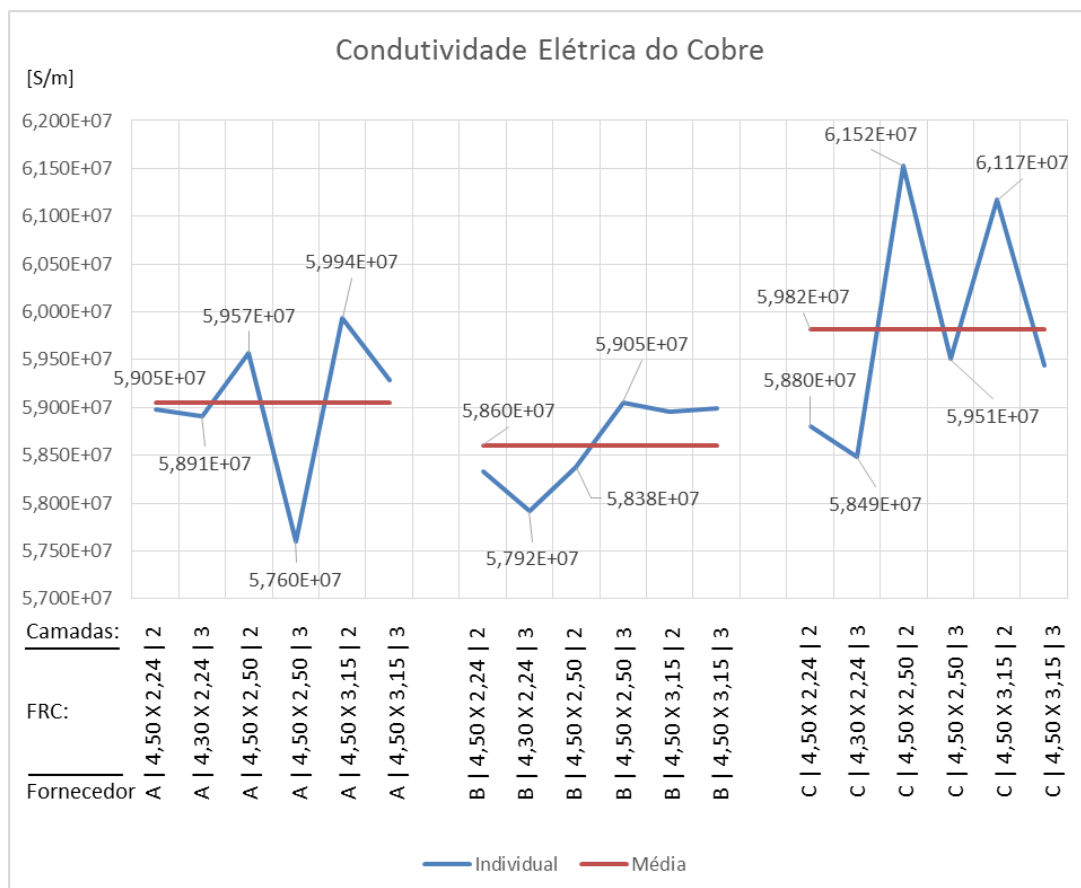


Figura 3.2. Condutividade elétrica das diferentes FRC

Da análise de condutividade elétrica observou-se que o cobre de B teve o valor médio mais baixo e do C o valor mais alto. A diferença entre ambos é de $0,122 \times 10^7$ S/m, correspondendo aproximadamente a 2,1 %. Para além disso o cobre de B, tendo o valor médio mais baixo, apresenta valores dos provetes ensaiados mais constantes, ou seja, mais próximos da média. Tendo A e C a média de condutividade do cobre mais alta que B, apresentam ainda valores dos provetes ensaiados mais dispersos entre si. É de referir ainda para estes dois fornecedores que os valores dos provetes correspondentes ao cobre isolado a 2 camadas têm valores de condutividade elétrica superiores ao das 3 camadas.

3.5.2 Medição dimensional do FRC

Procedimento de ensaio: Descrito no ponto 4 do Guia de ensaios em anexo.

Equipamento utilizado: Para determinação da largura e espessura dos provetes foi utilizado um micrómetro com resolução de $1 \mu\text{m}$ e uma precisão de $\pm 2 \mu\text{m}$. Este equipamento (especificado na Tabela 3.5) encontra-se com a calibração válida.

Tabela 3.5- Equipamento de medição utilizado no ensaio dimensional

	Marca	Modelo	Calibrado a:	Calibrar em:
Micrómetro	Mitutoyo	Série 103	22/02/2017	--/02/2018

Descrição das medições

Foram efetuadas medições em três pontos distanciados de 150 mm no sentido da largura e espessura do fio isolado (Figura 3.3) e ao fio depois de lhe remover o isolamento (Figura 3.4). A largura e espessura a considerar para cada fio resulta da média dos três pontos de medição, tanto para fio isolado como para fio de cobre nu. A diferença das duas médias representa o acréscimo de isolamento.



Figura 3.3. Provetes com isolamento utilizados para medição com micrómetro

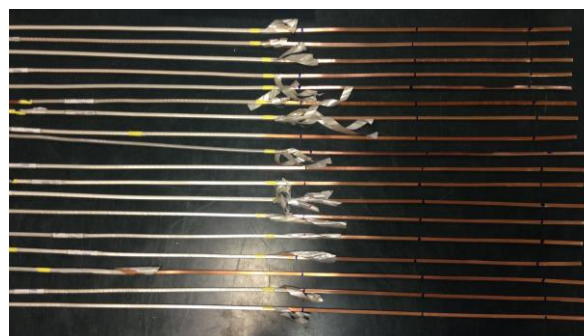


Figura 3.4. Provetes sem isolamento utilizados para medição com micrómetro

São apresentados na Tabela 3.6 os resultados dessas medições (colunas com designação Medic.) bem como os valores limites. As tolerâncias das dimensões do cobre nu e do cobre isolado são referenciadas na norma IEC 60317-0-2 enquanto que as tolerâncias do isolamento se encontram na norma IEC 60317-27.

Tabela 3.6. Resultados dimensionais do FRC (dimensões em mm)

			COBRE nu						ACRESCIMO DE ISOLAMENTO								COBRE isolado			
			Largura			Espessura			Largura				Espessura				Largura		Espessura	
Fornecedor A	2 camadas		Min.	Medic.	Max.	Min	Medic	Max.	Min.	Certif.	Medic.	Max.	Min.	Certif	Medic	Max.	Medic.	Max.	Medic.	Max.
4,5	x	2,24	4,45	4,507	4,55	2,21	2,242	2,27	0,324	0.30	0,298	0,36	0,324	0.30	0,312	0,36	4,805	4,91	2,553	2,63
4,5	x	2,50	4,45	4,480	4,55	2,47	2,528	2,53	0,324	0.35	0,305	0,36	0,324	0.34	0,363	0,36	4,785	4,91	2,892	2,89
4,5	x	3,15	4,45	4,507	4,55	3,12	3,16	3,18	0,324	0.31	0,312	0,36	0,324	0.33	0,335	0,36	4,818	4,91	3,495	3,54
Fornecedor A	3 camadas																			
4,5	x	2,24	4,45	4,473	4,55	2,21	2,232	2,27	0,4995	0.48	0,473	0,54	0,4995	0.51	0,513	0,54	4,947	5,09	2,745	2,81
4,5	x	2,50	4,45	4,530	4,55	2,47	2,525	2,53	0,4995	0.49	0,507	0,54	0,4995	0,500	0,500	0,54	5,037	5,09	3,025	3,07
4,5	x	3,15	4,45	4,498	4,55	3,12	3,152	3,18	0,4995	0.47	0,477	0,54	0,4995	0.47	0,498	0,54	4,975	5,09	3,65	3,72
Fornecedor B	2 camadas																			
4,5	x	2,24	4,45	4,483	4,55	2,21	2,235	2,27	0,324	0.25	0,297	0,36	0,324	0.30	0,313	0,36	4,780	4,91	2,548	2,63
4,5	x	2,50	4,45	4,482	4,55	2,47	2,507	2,53	0,324	0.27	0,280	0,36	0,324	0.28	0,287	0,36	4,762	4,91	2,793	2,89
4,5	x	3,15	4,45	4,535	4,55	3,12	3,172	3,18	0,324	0.27	0,310	0,36	0,324	0.28	0,317	0,36	4,845	4,91	3,488	3,54
Fornecedor B	3 camadas																			
4,5	x	2,24	4,45	4,485	4,55	2,21	2,233	2,27	0,4995	0.48	0,475	0,54	0,4995	0.49	0,488	0,54	4,960	5,09	2,722	2,81
4,5	x	2,50	4,45	4,510	4,55	2,47	2,528	2,53	0,4995	0.51	0,523	0,54	0,4995	0.50	0,525	0,54	5,033	5,09	3,053	3,07
4,5	x	3,15	4,45	4,540	4,55	3,12	3,167	3,18	0,4995	0.51	0,535	0,54	0,4995	0.52	0,540	0,54	5,075	5,09	3,707	3,72
Fornecedor C	4 camadas																			
4,5	x	2,24	4,45	4,515	4,55	2,21	2,258	2,27	0,666	0.575	0,618	0,72	0,666	0.58	0,712	0,72	5,133	5,27	2,970	2,99
4,5	x	2,50	4,45	4,500	4,55	2,47	2,527	2,53	0,666	0.61	0,608	0,72	0,666	0.58	0,617	0,72	5,108	5,27	3,143	3,25
4,5	x	3,15	4,45	4,505	4,55	3,12	3,167	3,18	0,666	0.58	0,600	0,72	0,666	0.585	0,662	0,72	5,105	5,27	3,828	3,90
Fornecedor C	3 camadas																			
4,5	x	2,24	4,45	4,485	4,55	2,21	2,242	2,27	0,4995	0.43	0,447	0,54	0,4995	0.41	0,457	0,54	4,932	5,09	2,698	2,81
4,5	x	2,50	4,45	4,515	4,55	2,47	2,503	2,53	0,4995	0.44	0,442	0,54	0,4995	0.45	0,450	0,54	4,957	5,09	2,953	3,07
4,5	x	3,15	4,45	4,517	4,55	3,12	3,155	3,18	0,4995	0.44	0,457	0,54	0,4995	0.45	0,467	0,54	4,973	5,09	3,622	3,72

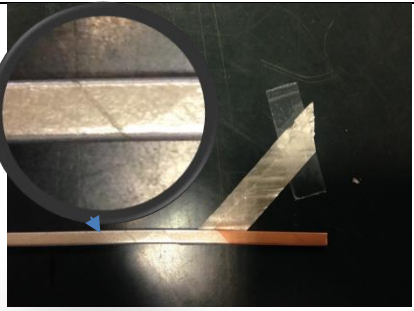
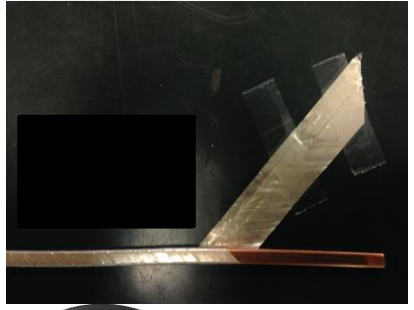
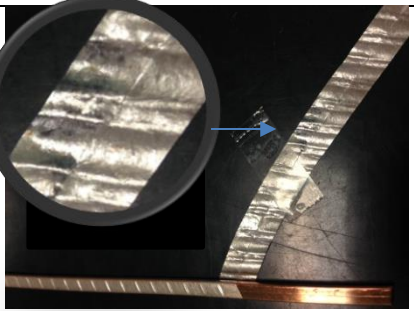
A verde estão assinalados os valores aceitáveis e a vermelho os valores que se encontram abaixo ou acima das tolerâncias. Verifica-se que dos 18 tipos de fio em análise, 15 deles têm valores dimensionais de isolamento abaixo do esperado e do que é exigível pela norma IEC 60317-27.

A informação que se encontra nos certificados de qualidade dos fornecedores é a dimensão do cobre isolado e do cobre nu. Consultando portanto os certificados de qualidade referentes ao cobre em estudo e calculando a medida do acréscimo de isolamento (apresentados na Tabela 3.6, coluna Certif.), verifica-se a falha de espessura de isolamento em várias situações, falhas essas quase todas coincidentes com as das nossas medições. Alguns casos apresentam valores bastante fora das tolerâncias, como é o caso do fornecedor B para FRC isolado a 2 camadas e no fornecedor C para FRC isolado a 3 camadas.

Esta situação pode representar falta de mica por camada de isolamento, ou seja, menor capacidade de isolamento entre espiras. É de salientar que este problema ocorre no FRC isolado a 2 camadas (adquirido para ensaios), bem como no FRC isolado a 3 camadas, que é atualmente utilizado em produção.

Na fase em que é removido o isolamento do cobre, foram analisadas as características de enfitamento, o comportamento da mica e anotada a largura da fita utilizada dos diferentes fabricantes, apresentando nas Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9 uma imagem e a respetiva observação.

Tabela 3.7. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 2,14 mm

Fornecedor	Largura da fita	Disposição da fita	Observações
Fabricante A 2 fitas = 2 camadas	9 mm		Ligeiro espaçamento entre a fita da segunda camada de isolamento
Fabricante A 3 fitas = 3 camadas	9 mm		Desfasamento correto de 33% entre camadas.
Fabricante B 1 fita = 2 camadas	10 mm		No desenrolar da fita de mica, verificou-se que a mesma se ia soltando. A fita de mica encontra-se bastante tencionada. Ao cortar o fio de cobre basta colar com fita adesiva de um dos lados, pois a fita de mica do lado oposto não se desenrola, efeito de espiral.

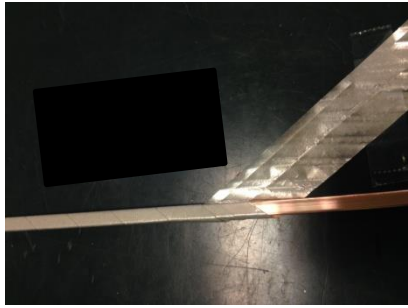

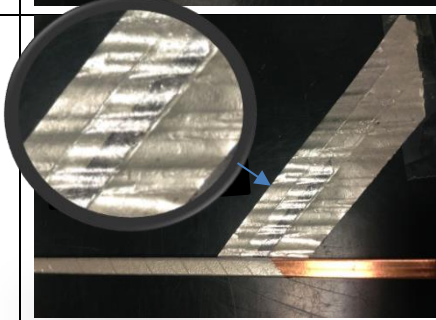
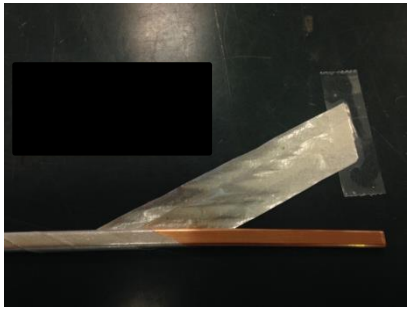
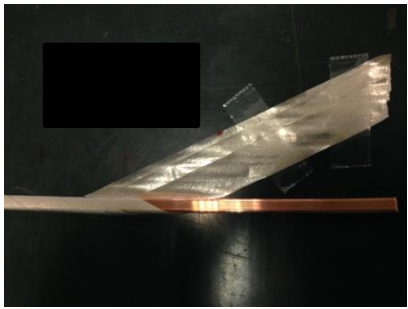
Fabricante B 3 fitas = 3 camadas	10 mm		Em relação ao mesmo fio de 2 camadas este apresenta a mesma largura de fita. O ângulo de ataque das fitas é menor uma vez que estas não se sobrepõem.
Fabricante C 2 fitas = 4 camadas	12 mm		2 Fitas de 12 mm sobrepostas a 50%, formando 4 camadas. As duas fitas estão desfasadas de aprox. 66%.
Fabricante C 3 fitas = 3 camadas	8 mm		Verifica-se que ao desenrolar a segunda fita, esta libertou a mica longitudinalmente em meia fita. Deu sensação de as fitas estarem coladas entre as várias camadas e com bastante tensão.

Tabela 3.8. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 2,50 mm

Fornecedor	Largura da fita	Disposição da fita	Observações
Fabricante A 2 fitas = 2 camadas	12 mm		Fita mais larga que o FRC 4,50 x 2,24 (2 camadas) do mesmo fabricante, e ângulo de ataque menor. Desfasamento correto de 50 % entre camadas.
Fabricante A 3 fitas = 3 camadas	12 mm		Fita mais larga que o FRC 4,50 x 2,24 (3 camadas) do mesmo fabricante, e ângulo de ataque menor. Desfasamento correto de 33 % entre camadas.

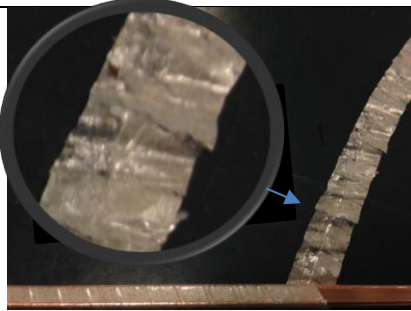

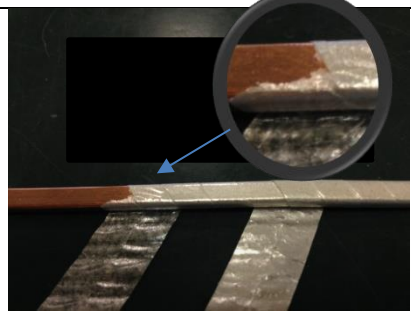
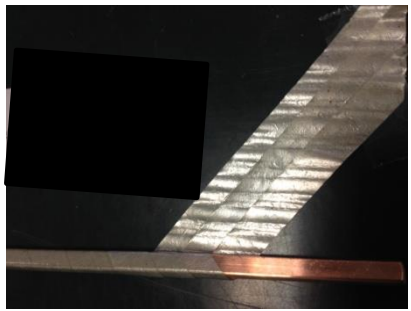


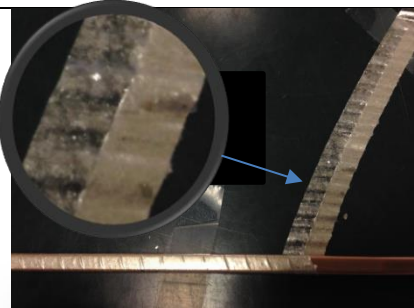
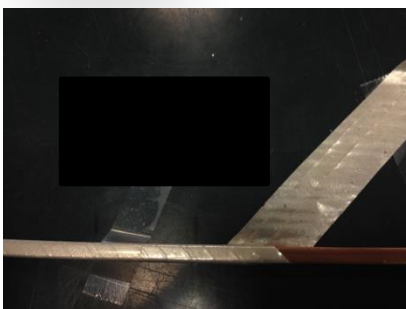

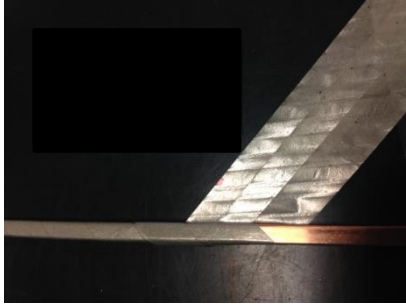
Fabricante B 1 fita = 2 camadas	10 mm		Mesma anotação que o FRC 4,50 x 2,24 (2 camadas) do mesmo fabricante
Fabricante B 3 fitas = 3 camadas	10 mm		Desfasamento correto de 33% entre camadas.
Fabricante C 2 fitas = 4 camadas	12 mm		A primeira fita encontrava-se muito agarrada ao cobre, inclusivamente ao desenrolar essa fita a mica ficava colada ao cobre.
Fabricante C 3 fitas = 3 camadas	8 mm		Desfasamento correto de 33% entre camadas.

Tabela 3.9. Comportamento da fita de mica para FRC 4,50 x 3,15 mm

Fornecedor	Largura da fita	Disposição da fita	Observações
Fabricante A 2 fitas = 2 camadas	12 mm		Mesmas condições do FRC 4,50 x 2,50 (2 camadas) do mesmo fabricante.

Fabricante A 3 fitas = 3 camadas	12 mm		Mesmas condições do FRC 4,50 x 2,50 (3 camadas) do mesmo fabricante.
Fabricante B 1 fita = 2 camadas	10 mm		Mesma anotação que para o FRC 4,50 x 2,24 (2 camadas) do mesmo fabricante.
Fabricante B 3 fitas = 3 camadas	10 mm		Desfasamento correto de 33 % entre camadas.
Fabricante C 2 fitas = 4 camadas	10 mm		Em comparação com o FRC 4,50 x 2,50 (4 camadas) do mesmo fabricante, a fita dava sensação de agarrar, mas não libertou mica.
Fabricante C 3 fitas = 3 camadas	10 mm		Desfasamento correto de 33 % entre camadas.

Para determinação do raio do boleado foram preparados 6 conjuntos agrupando as três medidas diferentes de fio de cobre por fornecedor e mesmo número de camadas. Estas amostras foram envolvidas com tecido de filtro e fita protetora e de seguida mergulhadas em resina. Optou-se por este método, para que depois de endurecido seja possível um corte perfeito sem rebarbas no cobre.

Recorreu-se aos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC para efetuar o corte, polimento da superfície e captação de imagens.

Depois de ser cortado a meio um segmento de cada amostra, criando assim 6 provetes cilíndricos de aproximadamente 2 cm de comprimento, estes passaram por um processo de pré-polimento manual com lixa de água 220. De seguida foi utilizada uma máquina com lixa 200 e 500 em movimento giratório a 1500 rpm e por fim foi adicionado uma pasta de diamante de 5 μ m obtendo uma superfície perfeitamente polida. Os provetes adequadamente identificados com nome do fabricante e número de camadas, foram lavados com acetona para remover resíduos do processo de polimento e colocados individualmente no microscópio para aquisição de imagem.

Com ampliação de 20 vezes foi possível adquirir uma imagem das 3 amostras do mesmo provete e com ampliação de 50 x foi possível adquirir imagens perfeitas de cada amostra do mesmo provete, como ilustrado na Figura 3.5 (exemplo do fornecedor A com isolamento a 2 camadas).

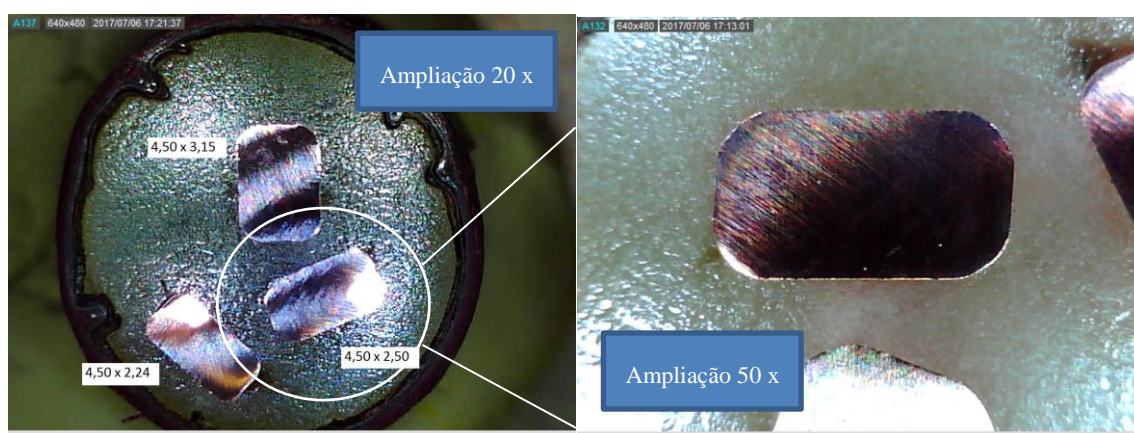


Figura 3.5. Provete Fornecedor A - 2 camadas

Usando Software de desenho técnico (Draftsight) foram ajustadas as imagens adquiridas com ampliação de 50 vezes, à escala das dimensões reais do cobre. Contornando com uma linha o perímetro da secção do cobre e transpondo-a lateralmente, facilmente foi determinado o raio dos 4 boleados do cobre (Figura 3.6). O raio final a considerar para cada tipo de fio de cobre é a média dos 4 raios anteriores.

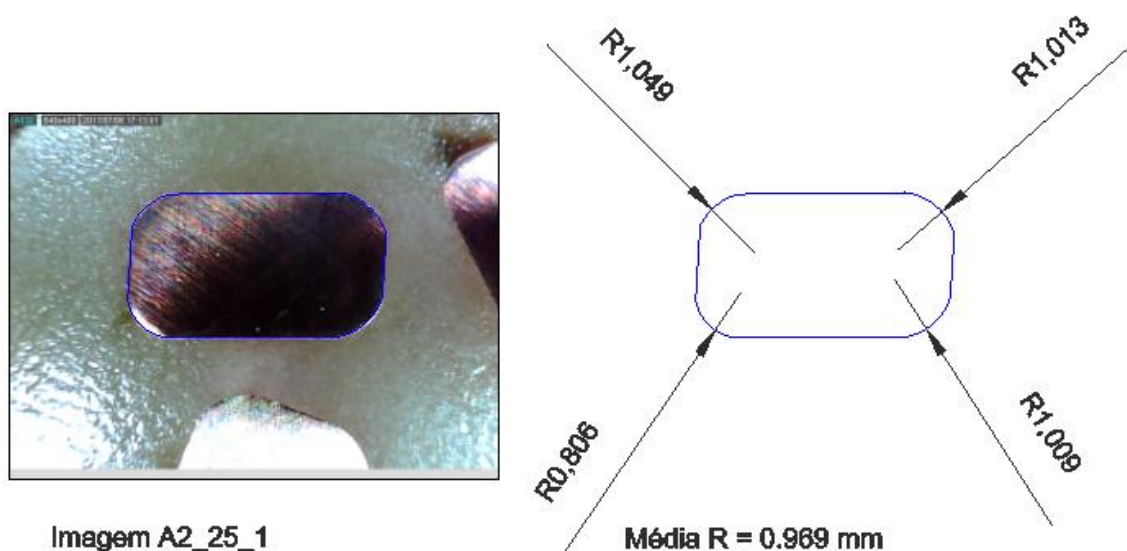


Figura 3.6. Exemplo da linha de contorno e indicação dos raios do boleado.

Resultados dos raios dos boleados

Os resultados estão detalhados na Tabela 3.10 nas colunas centrais, em que à esquerda tem a indicação da tolerância mínima e à direita a tolerância máxima.

Tabela 3.10. Resultados - Raios dos boleados

		Raio do Boleado				
			Fornecedor			
FRC	2 Camadas de fita	min	A	B	C	max
	4,5 x 2,24	0,488	0,647	0,544	0,721	0,813
	4,5 x 2,5	0,6	0,969	0,794	1,143	1
	4,5 x 3,15	0,6	1,094	0,846	1,15	1
FRC	3 Camadas de fita	min	A	B	C	max
	4,5 x 2,24	0,488	0,723	0,571	0,622	0,813
	4,5 x 2,5	0,6	0,828	0,844	0,883	1
	4,5 x 3,15	0,6	1,042	0,836	0,889	1

Os valores assinalados a verde estão dentro dos limites, contudo existem 4 valores a laranja principalmente para FRC 4,50 x 3,15 em que o raio é ligeiramente maior. É de ter em atenção este pormenor pois poderá ter consequências nas prensagens de bobinas, ou seja estando a incidir forças horizontais e verticais sobre as várias espiras, estas podem torcer-se uma vez que o cobre é muito arredondado lateralmente.

Em termos de FRC isolado a 2 camadas de mica o fornecedor B comparado com os outros dois fabricantes tem o cobre com o raio de boleado menor, ou seja, as arestas do fio de cobre são menos arredondadas. Em média estas diferenças são da ordem de 20 % comparado com o cobre do fornecedor A e 28% comparado com o cobre do fornecedor C. Devido a este pormenor e ao facto de que a fita de mica que envolve o fio de cobre estar mais tensionada, faz com que esteticamente o fio de cobre isolado tenha um tom mais cobreado.

Cuidados que foram tidos em conta durante este ensaio:

Correta utilização do micrómetro, colocando-o bem na perpendicular em relação ao provete e ajustando a força de aperto, utilizando a embraiagem de roquete com 2 a 3 cliques.

Ser o mais rigoroso possível com as medições pois como se trata de dimensões a nível de micrómetros, um pequeno desvio pode-se tornar num grande erro.

Foi imprescindível envolver as amostras de cobre em resina para efetuar o corte e polimento do cobre. Contudo uma nota para futuros ensaios é formar provetes resinados com diâmetro maior, na ordem dos 4 a 5 cm. Com diâmetros maiores torna-se mais fácil segurar o provete num plano correto contra a lixa rotativa, sem este se desviar.

3.5.3 Flexibilidade e aderência

Procedimento de ensaio: Descrito no ponto 5 do Guia de ensaios em anexo.

Equipamento utilizado: Para o ensaio à temperatura ambiente, a norma IEC 60317-0-2 indica a curvatura de 5 provetes no sentido da espessura e 5 provetes no sentido da largura de cada tipo de fio em análise com diâmetro de 4 vezes a largura e espessura do fio respetivamente. Resultam assim 4 diâmetros diferentes indicados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Diâmetro de pinos para ensaio de flexibilidade e aderência à T. ambiente

Curvatura sentido	Critério de cálculo	Ø do pino a utilizar
Largura	$4 \times 4,50 = 18$	18 mm
Espessura	$4 \times 2,24 = 8,96$	8,50 mm
	$4 \times 2,50 = 10$	10 mm
	$4 \times 3,15 = 12,6$	12,5 mm

Para este ensaio e para os seguintes em que é necessário curvar o FRC segundo um diâmetro específico, foram adquiridos acessórios de nylon cortados a jato de água com as seguintes dimensões.

Diâmetro de 8,5 mm, 10 mm, 12,5 mm e 15 mm: 2 discos de 1 mm espessura

1 disco de 3 mm de espessura

1 disco de 3,5 mm de espessura

Diâmetro de 18 mm e 25 mm: 1 cilindro de 10 mm de comprimento

Diâmetro de 50 mm: 2 discos de 5 mm de espessura

A opção de ter para os mesmos diâmetros vários discos com espessuras diferentes tem a ver com as dimensões do FRC isolado e de maneira a se poder ter várias combinações de discos e assim diferentes espaçamentos, como por exemplo: 1; 2; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6,5; 7,5; e 8,5 mm.

Para conseguir curvar o FRC em ambos os sentidos pedidos foi desenhada e recortada em fibra de vidro (Figura 3.7 e Figura 3.8) uma ferramenta com um ponto de fixação para os discos e com duas hastes. O mais complicado a curvar é o sentido da largura, pois devido ao esforço mecânico o cobre tem tendência a rebater/torcer na zona da curva. Para evitar essa situação é escolhido a espaçamento de disco com a menor folga e um acrílico transparente a fazer de batente superior.

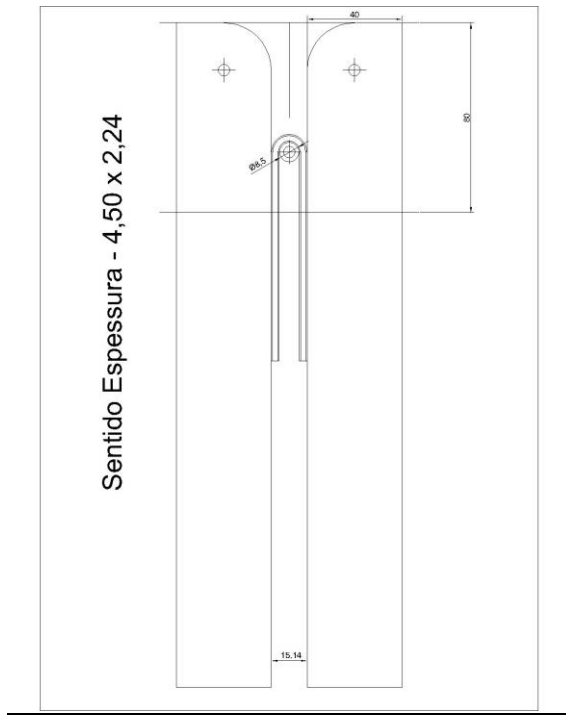


Figura 3.7. Desenho da ferramenta de curvar

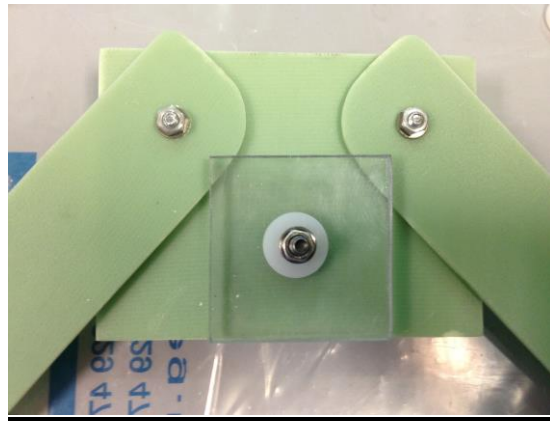


Figura 3.8. Ferramenta de curvar

Descrição do ensaio:

Foram curvados um total de 90 provetes no sentido largura e 90 provetes no sentido espessura, dos quais se anotaram comportamentos diferentes das várias camadas de isolamento.

A fita fica bastante levantada e enrugada na zona da curva para largura de fita de 12 mm com pequeno ângulo de ataque, ilustrado na Figura 3.9. Verificou-se esse comportamento nos provetes do fornecedor A com as dimensões 4,50 x 2,50 e 4,50 x 3,15 mm, tanto com 2 e 3 camadas de isolamento. Na zona em que a fita fica levantada, do cobre isolado a duas camadas, o isolamento é apenas assegurado pela camada inferior, contudo não é visível o cobre.



Figura 3.9. Sentido Largura – Fornecedor A - 4,50 x 2,50 – 2 camadas

A fita fica bem justa, no entanto ao longo do boleado do cobre, o isolamento fica mais transparente, podendo ser sinal de falta de mica. (ver Figura 3.10). Este comportamento verificou-se nas 3 diferentes medidas do fornecedor B com isolamento a 2 camadas. Em nenhum dos casos houve rutura do isolamento nem exposição direta do cobre.

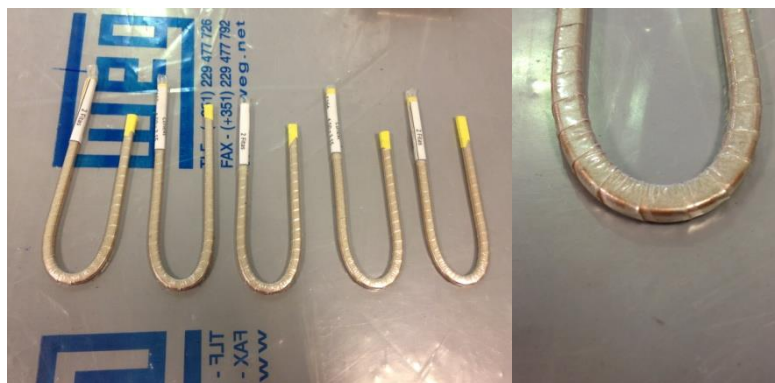


Figura 3.10. Sentido Largura – Fornecedor B - 4,50 x 3,15 - 2 camadas

Todos os 90 provetes curvados no sentido da espessura resistiram ao ensaio à temperatura ambiente. Assim foram colocados em forno com circulação de ar a 180°C durante 30 min para simular, segundo a norma WPS-2828 PT, o envelhecimento do material e verificação do comportamento da fita de mica ao impacto do calor. É de referir que estes provetes foram curvados com discos de diâmetro de 4 vezes a espessura, no entanto a norma IEC 60317-0-2 estipula para este ensaio a utilização de discos com diâmetro de 6 vezes a espessura do cobre, ou seja discos com um diâmetro maior.

No caso do FRC do fornecedor A, a fita que se encontrava balofa na zona da curva ficou ligeiramente mais endurecida e quebradiça depois de ter estado durante 30 min à temperatura de 180 °C. Em alguns provetes apresentou sinais de início de rutura de isolamento (Figura 3.11).

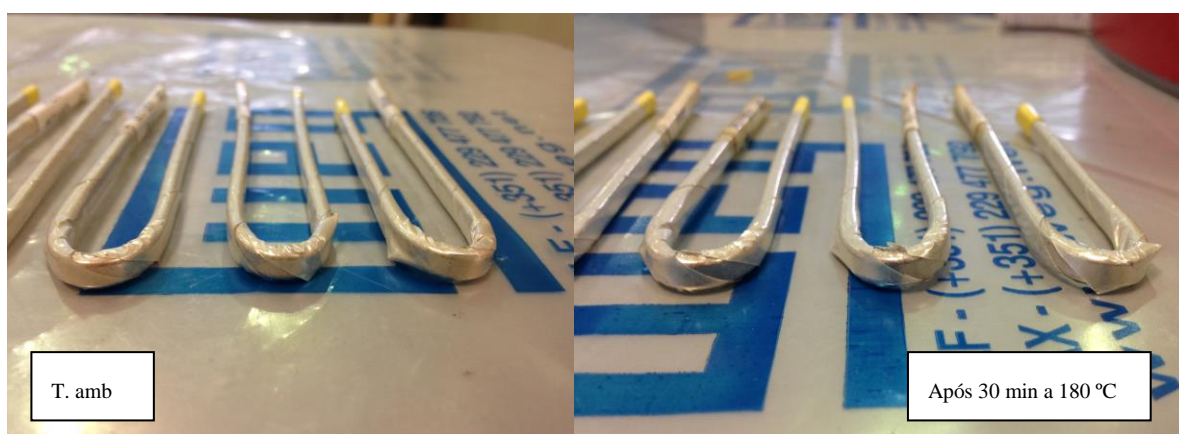


Figura 3.11. Sentido Espessura – Fornecedor A - 4,50 x 2,50 - 2 camadas

Um provete do fornecedor B após ter sido retirado do forno teve mesmo rutura da fita de mica (ver Figura 3.12 imagem da direita). Novos provetes foram curvados segundo a norma IEC 60317-0-2, passando do disco com diâmetro de 10 mm para 15 mm. Estes novos provetes depois de permanecerem durante 30 min a 180 °C não tiveram fissuras nem ruturas de isolamento.

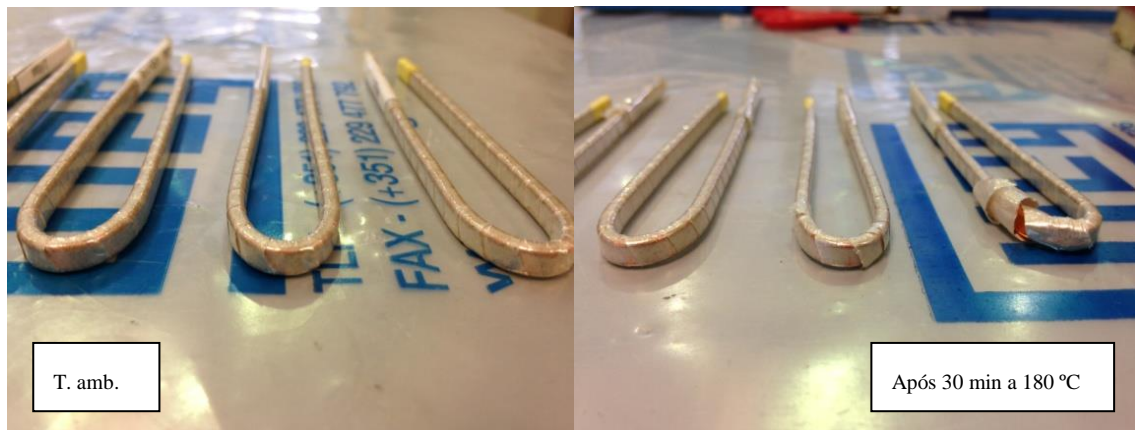


Figura 3.12. Sentido Espessura – Fornecedor B - 4,50 x 2,50 - 2 camadas

Dentro do segmento de FRC isolado a 3 camadas foi o do fornecedor C que apresentou melhor comportamento ao calor, contudo um provete de dimensão 4,50 x 3,15 mm isolado a 4 camadas teve uma fissura numa das camadas interna (Figura 3.13). Esta fissura representou um ponto frágil no provete mas não foi motivo de invalidar o ensaio pois o cobre continuava naquele ponto isolado com 2 das 4 camadas.



Figura 3.13. Sentido Espessura – Fornecedor C - 4,50 x 3,15 - 4 camadas

3.5.4 Ensaio de rigidez dielétrica – Tensão de rutura a provetes

Procedimento de ensaio: Descrito no ponto 6 do Guia de ensaios em anexo.

Equipamento utilizado: Aparelho de ensaio de rigidez dielétrica da marca Phenix Technologies modelo 6TCE30-125 (Figura 3.14). Foi configurada, segundo a norma IEC 60851-5, uma rampa de subida da tensão de 500 V/s. Como tensão de ensaio foi determinado um valor bastante acima da tensão de rutura esperada, neste caso de 25 kV, garantindo assim que a tensão aumente até romper o isolamento no entanto limitando a corrente de curto-circuito em 5 A.



Figura 3.14. Equipamento de ensaio de rigidez dielétrica

Foi utilizado um recipiente metálico de 500 ml de capacidade, no qual foi fixado, desde a base do interior do recipiente até ao lado exterior, um FRC ao qual será ligado o terminal negativo do aparelho de medição. Este recipiente sendo metálico é colocado em cima de uma bancada de madeira e uma placa de fibra de vidro para garantir que quando ocorre a disrupção do isolamento, a passagem da corrente seja feita pelo terminal negativo.

A gralha de aço em que será mergulhado o provete já curvado (segundo o Guia de Ensaio) terá a função de neutro. A gralha utilizada (ref. WS 390) é do tipo esférica e garante a granulometria abaixo de 2 mm como se pode verificar na Figura 3.15 obtida pelo fornecedor.

Produto	7	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	80	120
WS 780			90 min	97 min												
WS 660		20 max		97 max												
WS 550			30 max		90 min	97 min										
WS 460				30 max		90 min	97 min									
WS 390				20 max		85 min	97 min									
WS 330					10 max		85 min	97 min								
WS 280						30 max		90 min	97 min							
WS 230							30 max		90 min	97 min						
WS 170								30 max		90 min	97 min					
WS 110									20 max					90 min	97 min	
WS 70											5 max				90 min	97 min
Nº Peneiro	7	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	80	120
Dimensão	2,80	2,36	2,00	1,70	1,40	1,18	1,00	0,85	0,71	0,60	0,50	0,42	0,35	0,30	0,18	0,12
Peneiro (mm)																

: passa tudo
 % : Retenção acumulada no peneiro
 Norma: ASTM E11-04

Figura 3.15. Gráfico da granulometria da gralha de aço

Segundo o Guia de Ensaio em anexo, foram preparados 10 provetes dos quais 5 conforme o ponto 6.3.1. e 5 provetes conforme o ponto 6.3.2. Os 10 provetes são idênticos, diferindo apenas em que 5 deles são colocados numa estufa a 180 °C durante 30 minutos e deixados arrefecer antes de efetuar o ensaio de rigidez dielétrica. Assim é possível comparar os resultados dos 2 conjuntos de provetes e verificar as características isolantes após impacto térmico.

Quanto aos pinos de curvar os provetes optou-se pelo diâmetro de 15 mm pelo facto de aproximar o ensaio às condições de produção. Este valor corresponde ao menor diâmetro de pinos utilizados em projeto de enrolar navetes, simulando assim o pior caso.

Descrição do Ensaio

Os provetes foram ensaiados individualmente. Para isso foram utilizados dois recipientes iguais em que ao passar a granalha de um para o outro é inserido previamente o novo provete respeitando as distâncias mínimas mencionadas no ponto 6.3.1 do Guia de ensaios. Depois do provete estar mergulhado em granalha de aço, são ligados os terminais do aparelho de ensaio. O neutro é ligado ao fio de cobre previamente preparado no recipiente metálico e o terminal positivo é ligado diretamente ao cobre condutor do provete. À semelhança da Figura 3.16, é utilizado um batente em borracha e placas de fibra de vidro, a isolar zonas em que é possível existir uma diferença de potencial. Por exemplo entre o terminal positivo e o recipiente metálico e entre as duas extremidades do provete.

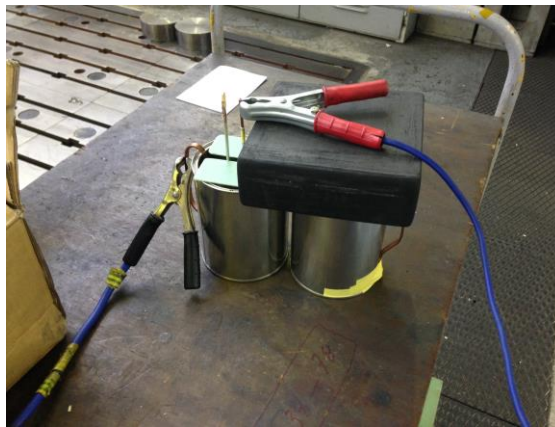


Figura 3.16. Ligação do provete ao aparelho de ensaio de rigidez dielétrica

Resultados

São representados na Figura 3.17 à Figura 3.19 os resultados dos ensaios do FRC com o isolamento proposto a 2 camadas de fita de mica e como já visto no caso do fornecedor C isolado a 4 camadas. São apresentados sob forma de gráfico de modo a ter toda a informação concentrada e mais facilmente ser possível observar as diferenças.

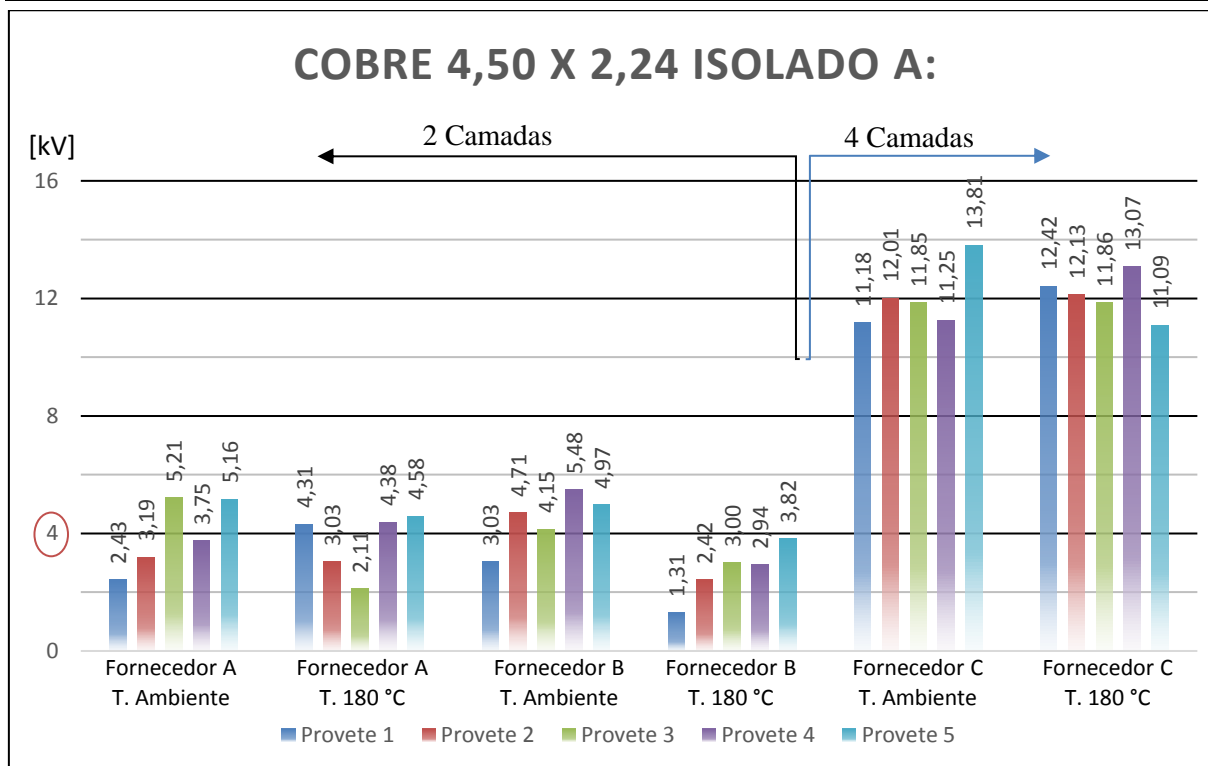


Figura 3.17. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,24 para testes

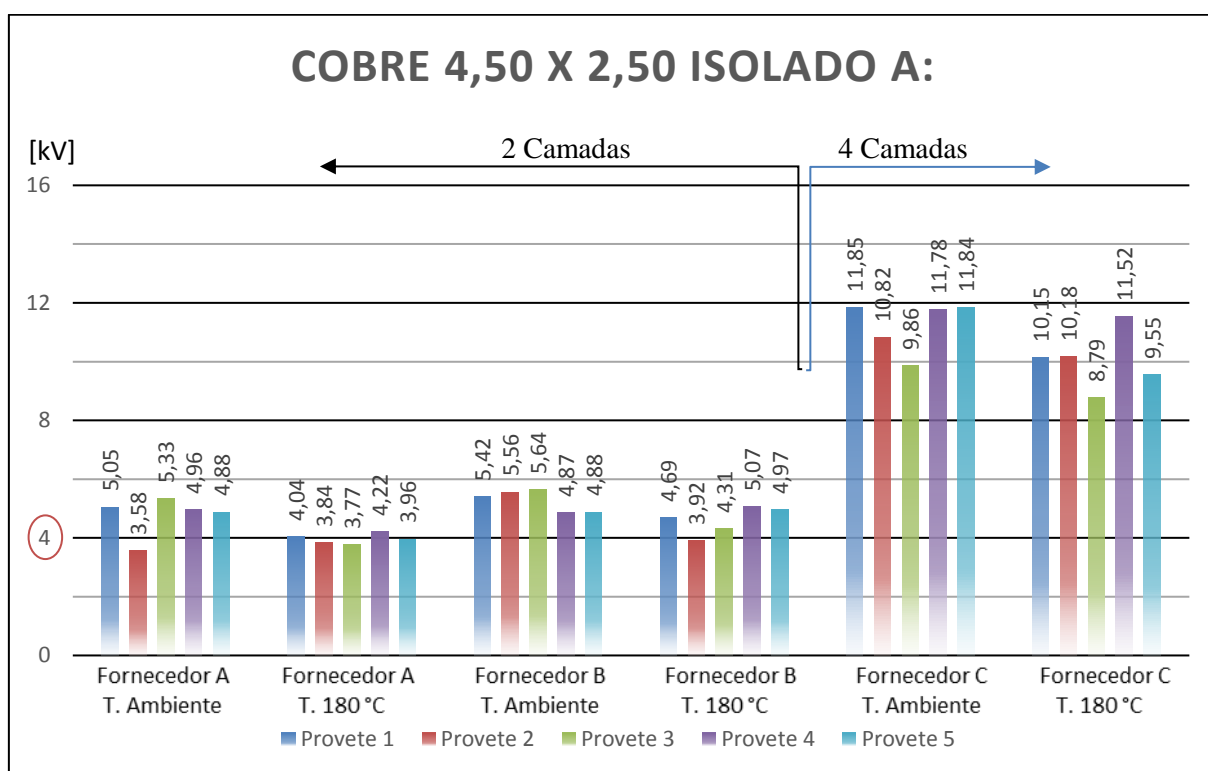


Figura 3.18. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,50 para testes

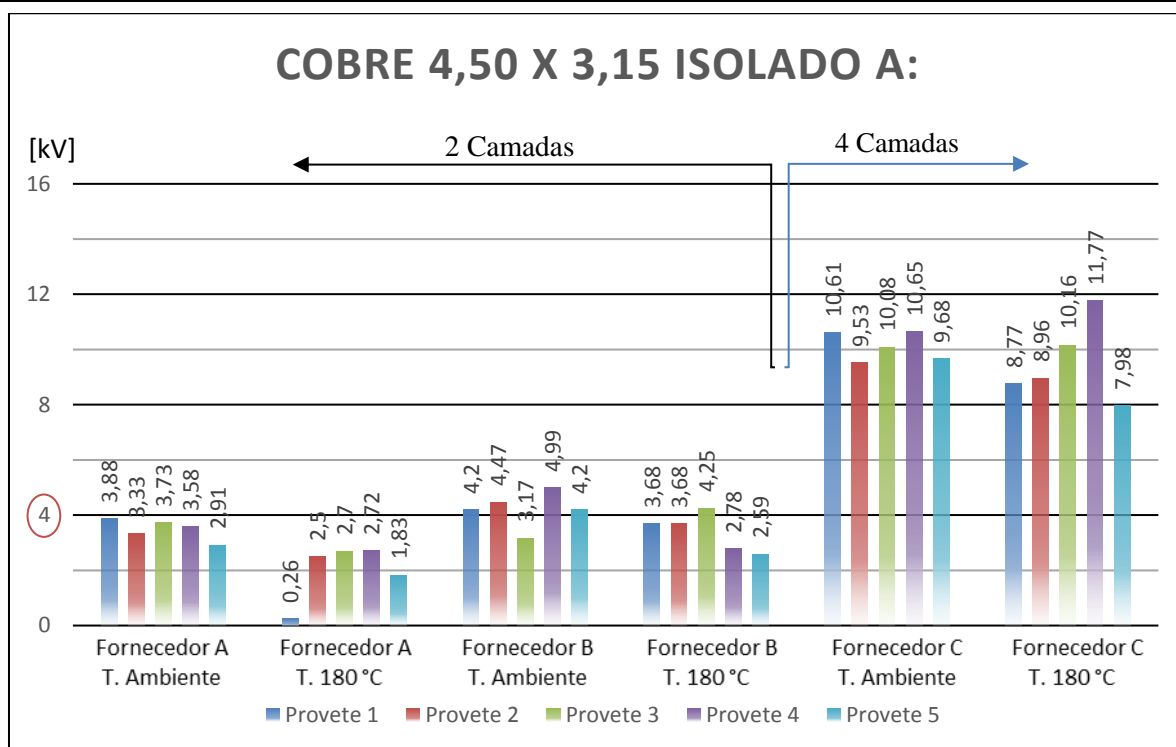


Figura 3.19. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 3,15 para testes

Para FRC isolado a 2 camadas de mica e segundo a norma WPS-2828 PT, pelo menos 4 dos 5 provetes não devem romper com tensões inferiores a 4 kV e o quinto provete não deve romper com tensão inferior a 50%, ou seja, 2 kV. Analisando os resultados obtidos das 3 diferentes medidas de FRC isolado a 2 camadas de mica à temperatura ambiente apenas o fabricante B cumpriu os requisitos tendo tido apenas um provete para as medidas de cobre de 4,50 x 2,24 e 4,50 x 3,15 com o valor de rutura entre 2 kV e 4 kV. Daqui pode-se concluir que apesar do isolamento dar a sensação de transparência, apresentando um tom cobreado ao longo do fio, não se traduziu numa falha pois apresentou boa capacidade de isolamento.

O fornecedor A obteve valores conformes para o FRC com as dimensões de 4,50 x 2,50, mas em contrapartida teve 3 provetes com tensão de rutura abaixo de 4 kV para FRC de 4,50 x 2,24 mm e todos os 5 provetes abaixo de 4 kV para FRC de 4,50 x 3,15 mm.

A colocação dos provetes à temperatura de 180 °C durante 30 min, reduziu no geral a capacidade de isolamento, descendo a tensão de rutura na ordem de 1 kV. O FRC de 4,50 x 2,24 e 4,50 x 3,15 passou para valores muito reduzidos com alguns abaixo de 2 kV, inclusivamente um provete com tensão de 0,26 kV. Tal como foi visto no ensaio de flexibilidade e aderência, o isolamento sofre na zona de curvatura com a temperatura. Este efeito será maior quanto menor o diâmetro com que o provete for curvado.

Das três medidas diferentes de FRC em estudo, foi a medida 4,50 x 2,50 mm que apresentou melhores resultados de ensaio, tendo um comportamento mais uniforme e linear dos diferentes provetes e menor impacto à temperatura.

Da Figura 3.20 à Figura 3.22 são apresentados sob forma de gráfico, os valores dos ensaios para o FRC isolado a 3 camadas de fita de mica.

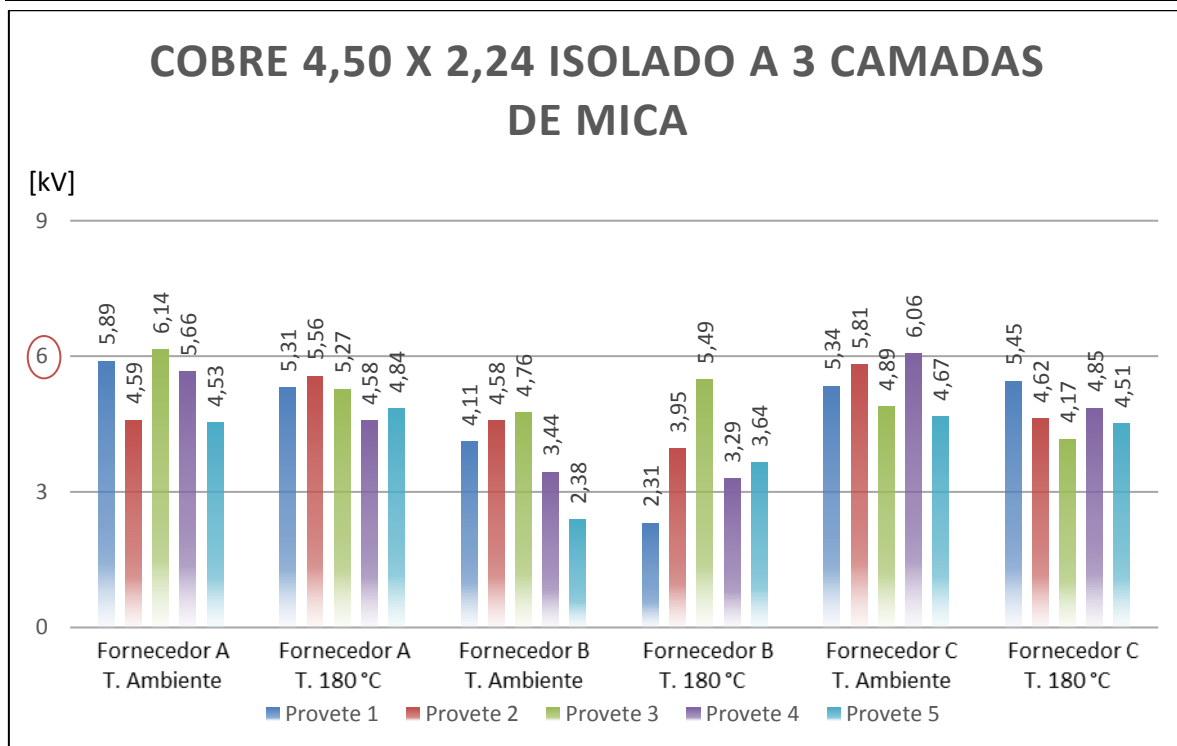


Figura 3.20. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,24 - 3 camadas

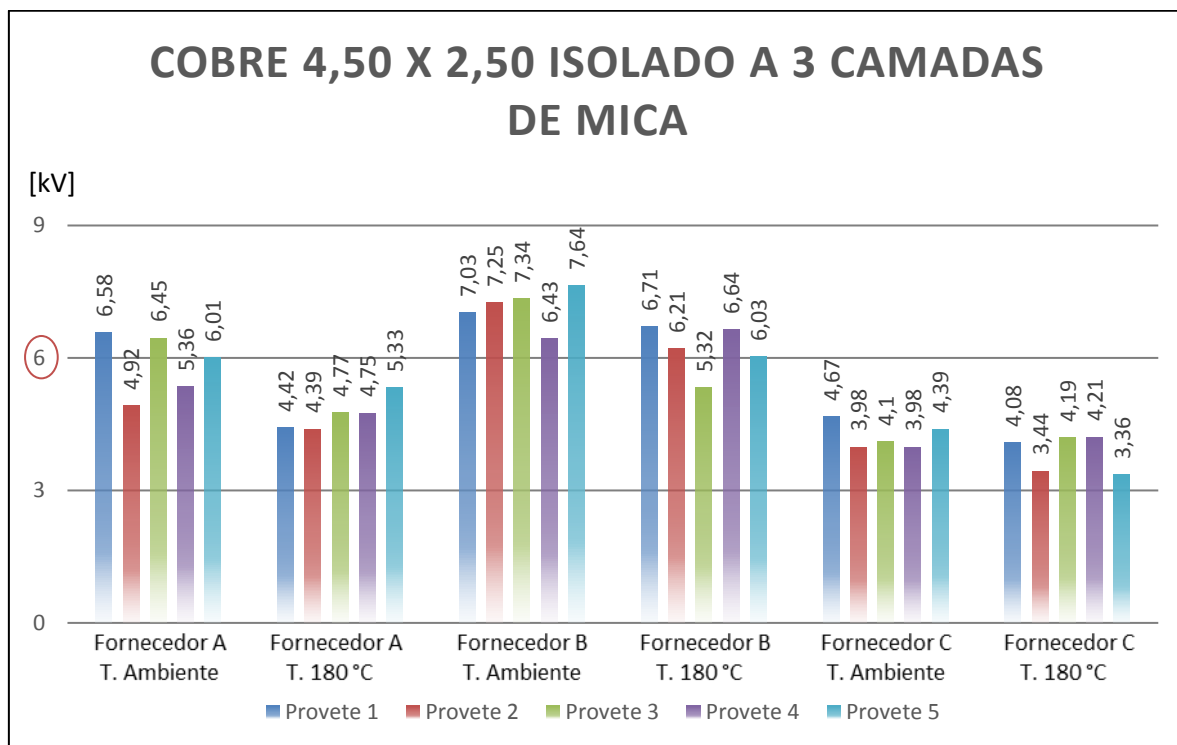


Figura 3.21. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 2,50 - 3 camadas

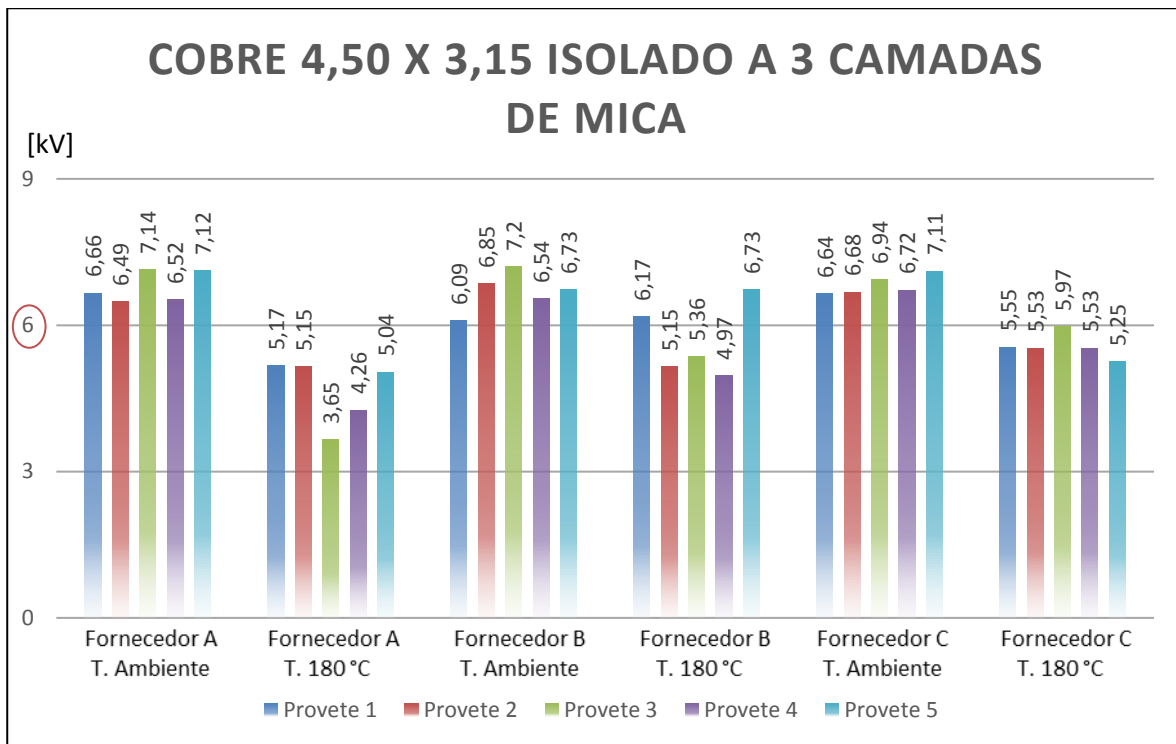


Figura 3.22. Resultados de rigidez dielétrica FRC 4,50 x 3,15 - 3 camadas

Para FRC isolado a 3 camadas de mica e segundo a norma WPS-2828 PT, pelo menos 4 dos 5 provetes não devem romper com tensões inferiores a 6 kV e o quinto provete não deve romper com tensão inferior a 50%, ou seja, 3 kV.

Analisando os resultados obtidos para FRC isolado a 3 camadas, apenas o FRC com as dimensões 4,50 x 3,15 mm teve valores aceitáveis nos provetes dos 3 fornecedores. Em relação ao cobre com dimensões mais reduzidas em termos de espessura, vários provetes apresentaram não conformidades principalmente na dimensão 4,50 x 2,24 mm em que o FRC tem um perfil mais laminado.

O fabricante B apresenta também para FRC isolado a 3 camadas de mica, os melhores resultados, exceto para as dimensões de 4,50 x 2,24 em que teve os valores mais reduzidos com todos os provetes abaixo dos 6 kV, incluindo um provete abaixo do limite de 3 kV.

3.6 Benefícios económicos

Considerando 80% do consumo de cobre a ser utilizado na produção de motores de MT e 20 % em AT, calcularam-se os consumos das três medidas de FRC utilizados nos ensaios. Podem-se consultar na Tabela 3.12 as quantidades de cobre para o período de 01 de Janeiro de 2016 até 13 de Novembro de 2017.

Tabela 3.12. Consumos de 3 medidas de FRC - ano 2016 e 2017

Descrição	CONSUMO 2016	CONSUMO 2017*	CONSUMO 2016 + 2017*
FRC N3FM 0,54 4,5X2,24 T 80	3458 kg	301 kg	3759 kg
FRC N3FM 0,54 4,5X2,5 T 80	4457 kg	3014 kg	7470 kg
FRC N3FM 0,54 4,5X3,15 T 80	5166 kg	2157 kg	7323 kg
Soma	13081 kg	5471 kg	18552 kg

* Consumo do ano 2017 de 01/01/2017 a 13/11/2017

Foi pedido aos 3 fornecedores cotação para FRC isolado a 3 camadas e a 2 camadas a fim de se poder determinar a redução de custos com essa substituição. Para FRC isolado a 2 camadas foi pedido o mesmo método construtivo, uma fita sobreposta a 50%, pois foi o que apresentou melhores resultados nos ensaios. A diferença de preços por quilograma das três dimensões de FRC por cada fornecedor é apresentada na Tabela 3.13.

Distribuindo os consumos de cobre de 2016 e 2017 (apenas contabilizando as três dimensões de FRC em estudo), em partes iguais pelos 3 fornecedores, obter-se-ia para o consumo respetivo ao ano de 2016, um benefício económico na ordem de 3.600 € e de 2017 na ordem de 1.500 €.

Tabela 3.13. Cotações e benefícios económicos para 3 medidas de FRC

Fornecedor A		Benefício Económico	
Descrição	Diferença	2016	2017*
FRC 4,5X2,24	0,32 €/kg	368,88 €	32,08 €
FRC 4,5X2,5	0,30 €/kg	445,65 €	301,35 €
FRC 4,5X3,15	0,25 €/kg	430,50 €	179,75 €
Subtotal		1 245,03 €	513,18 €
Fornecedor B		Benefício Económico	
Descrição	Diferença	2016	2017*
FRC 4,5X2,24	0,41 €/kg	472,63 €	41,10 €
FRC 4,5X2,5	0,35 €/kg	519,92 €	351,58 €
FRC 4,5X3,15	0,25 €/kg	430,50 €	179,75 €
Subtotal		1 423,05 €	572,43 €
Fornecedor C		Benefício Económico	
Descrição	Diferença	2016	2017*
FRC 4,5X2,24	0,25 €/kg	288,19 €	25,06 €
FRC 4,5X2,5	0,23 €/kg	341,66 €	231,04 €
FRC 4,5X3,15	0,19 €/kg	327,18 €	136,61 €
Subtotal		957,03 €	392,71 €
TOTAL		3 625,12 €	1 478,32 €

Diferença calculada com valores indicativos para quantidade de 500 kg ao dia 9/11/2017

* Consumo do ano 2017 de 01/01/2017 a 13/11/2017

A média da diferença na substituição de FRC isolado a 3 camadas para 2 camadas é de 0,28 €/kg correspondendo a uma redução de 3,48 %.

De modo a ter uma análise mais abrangente, foi consultado o consumo de todo o cobre para o mesmo período anterior, ou seja, de 01/Jan/2016 a 13/Nov/2017. Considerando um consumo de 80 % na produção de motores de MT e 20 % na produção de motores de AT, obteve-se a Tabela 3.14 onde estão discriminadas as quantidades por ano. Para estas condições obter-se-ia para o consumo respetivo ao ano de 2016, um benefício económico na ordem de 21.200 € e de 2017 mais de 23.900€, uma vez que o consumo referente a 2017 foi contabilizado apenas até 13 de Novembro.

Tabela 3.14. Benefício económico para todas as medidas de FRC

Ano	2016	2017*
Consumo total anual	94.671 kg	106.646 kg
Consumo MT 80%	75.737 kg	85.317 kg
Beneficio económico médio	0,28€/kg	
Beneficio económico anual	21 206,24 €	23 888,62 €

* Consumo do ano 2017 de 01/01/2017 a 13/11/2017

3.7 Conclusões

Com este capítulo pode-se retirar informação útil para o futuro, como a importância de uma boa comunicação perante o fornecedor no momento da compra e um cuidado reforçado no controlo de qualidade da matéria-prima.

Dos ensaios realizados, comprovaram-se diferenças nos FRC isolados a 2 camadas devido ao seu método construtivo. O que apresentou melhores resultados foi o fabricante B com uma fita de mica sobreposta a 50%, principalmente no ensaio de rigidez dielétrica em que foi o único a conseguir respeitar os valores mínimos.

Economicamente justifica-se a substituição do FRC isolado a 3 camadas para as pretendidas 2 camadas em motores de MT, no entanto não se pode ficar apenas restringido a um fornecedor. O passo seguinte será pedir aos outros 2 fornecedores uma amostra de cobre isolado a uma fita sobreposta a 50% e repetir para estes os ensaios de aprovação.

Em relação a todo o FRC que foi testado, a espessura de isolamento é menor do que esperado e menor que indicado pela norma IEC 60317-27. Será portanto agendada uma reunião com os fornecedores de cobre para esclarecer esta situação assim como os baixos resultados obtidos nos ensaios de rigidez dielétrica do FRC isolado a 3 camadas. Esta situação é muito relevante pois é este FRC que está atualmente a ser usado em motores de MT bem como AT. Se o problema for efetivamente falta de mica na espessura de isolamento, este terá de ser rapidamente resolvido. Poderá ser a solução para colocar os resultados de rigidez dielétrica do FRC isolado a 3 camadas acima da barreira do valor mínimo e poderá acrescentar uma margem de segurança e tornar a utilização do FRC isolado a 2 camadas mais fiável.

Conclui-se também destes ensaios que todas as amostras de FRC apresentaram fragilidades ao serem expostas à temperatura de 180 °C durante 30 min. No ensaio de flexibilidade e aderência, observou-se que o isolamento ficava mais endurecido e quebradiço, algumas fissuras e um provete em que a fita de mica rompeu. Nos ensaios de rigidez dielétrica a tensão de rotura também sofreu com a temperatura descendo na ordem de 1kV.

No capítulo seguinte será abordado o tema da prensagem térmica e efetuadas prototipagens de navetes com os 18 tipos diferentes de FRC analisados anteriormente.

4 Análise e melhoria do processo de prensagem térmica

4.1 Introdução

Substituir o FRC isolado a 3 camadas por 2 camadas e não controlar o processo de prensagem térmica em nada garante uma redução efetiva da largura e espessura da parte reta da bobina.

A prensagem térmica de navetes faz parte do processo construtivo de bobinas de MT e AT. Consiste em compactar e conformar as navetes na zona da parte reta das bobinas, a fim de reduzir a largura e espessura do núcleo da bobina. Uma boa prensagem tem como resultado dimensões uniformes e sem deformações ao longo da parte reta da bobina. Em contrapartida, se não forem respeitadas algumas regras, a prensagem térmica pode não ter resultados positivos ou até mesmo danificar o isolamento entre espiras.

No processo de prensagem, os parâmetros que podem ser balanceados, para além da temperatura, são o tempo de ciclo e a pressão/força de prensagem. Tem de existir um bom compromisso entre os três parâmetros, pois estes estão interligados entre si.

A otimização do processo de prensagem térmico, conduzirá a:



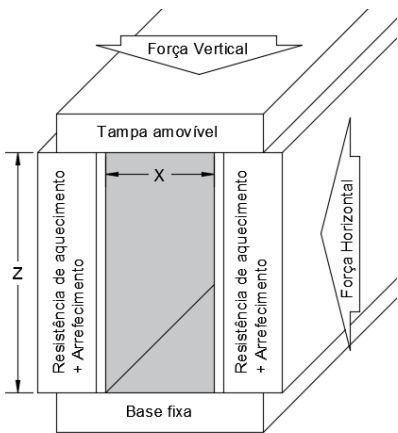
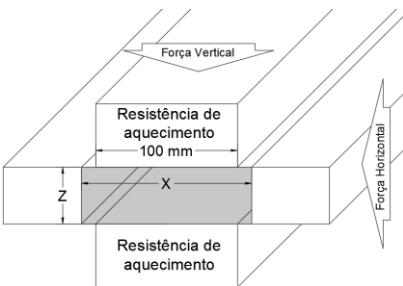
- Aumento da qualidade do produto final.
- Menor tempo de ciclo de operação, aumentando assim a produtividade e reduzindo consumos energéticos por quantidade de bobinas.
- Temperatura adequada para fundir e curar a fita de resina e não prejudicar a capacidade de isolamento da fita de mica que isola o FRC.
- Pressão adequada para compactar as espiras sem danificar o isolamento ou esmagar o FRC.

Foi adquirida uma prensa nova de bobinas em 2016. No entanto, só agora no âmbito deste estágio foi decidido avançar com a utilização da mesma e colocá-la em produção. No ponto seguinte serão caracterizadas ambas as prensas e comparadas entre si.

4.2 Características principais das prensas térmicas

Como é de esperar da evolução tecnológica, a prensa nova tem vantagens que se notam à primeira vista, como, p. ex., a consola tátil que permite introduzir facilmente programas e ajustar parâmetros de operação. São apresentadas na Tabela 4.1. as principais características de ambas as prensas.

Tabela 4.1. Características principais das prensas

Prensa	Nova	Antiga
Marca /Modelo	Schümann / 459	Micafil / SPhE-I
Imagem da prensa		
Caixa de prensagem	 <p>$X = [\text{min}; \text{max}] = [51; 66] \text{ mm}$</p> <p>$Z = 124 \text{ mm}$</p>	 <p>$X \text{ recomendado} \leq 100 \text{ mm}$</p> <p>$X \text{ max.} = 120 \text{ mm}$</p> <p>$Z \text{ fixo} = 40 \text{ mm}$</p>
Força de prensagem		
Vertical	70 N	98 N
Horizontal	180 N	31,36 N
Resistências		
Alimentação	Trifásica	Monofásica
Arrefecimento (ar - água)	Sim	Não
Fixação ao eixo	Horizontal	Vertical

A prensa antiga é aquecida através das resistências monofásicas à temperatura programada e controlada por dois sensores, um em cada resistência, superior e inferior. A temperatura programada é a mesma para todo o processo, desde o início do ciclo em que são colocadas as navetes na prensa até final do ciclo. A abertura da prensa é automática e coincidente com o fim do temporizador da prensagem principal. Se a prensa ficar em standby, as resistências continuarão a ser aquecidas, mantendo-se à temperatura do ciclo de prensagem.

As etapas de prensagem desta prensa são as indicadas na Figura 4.1 em que as designações T2, t1, e t2 são parâmetros que serão ajustados no capítulo 4.5.

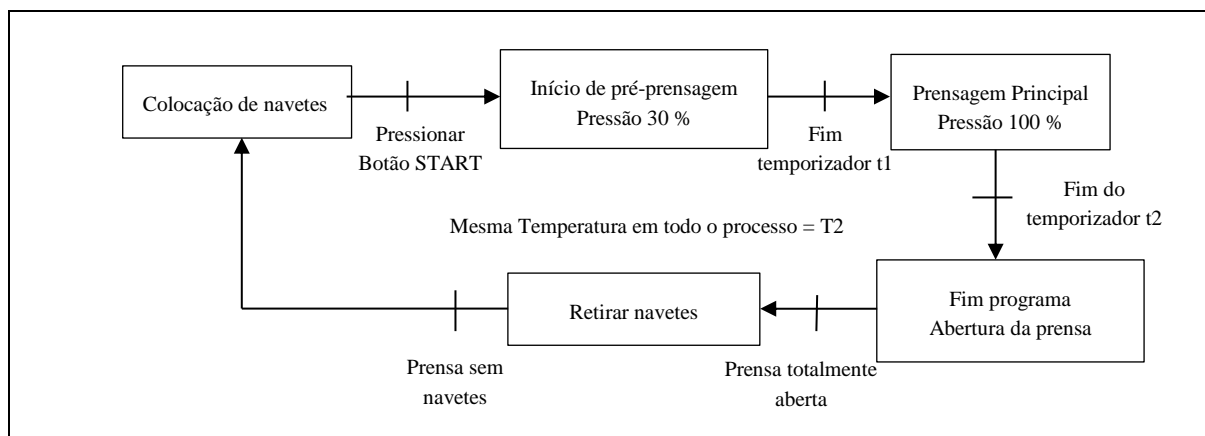


Figura 4.1. Etapas de funcionamento da prensa antiga

As resistências de aquecimento da prensa nova são trifásicas, o que se traduz numa distribuição da potência elétrica consumida pelas três fases. O comprimento do par de resistências a utilizar em cada módulo de prensagem vai depender do comprimento da parte reta da bobina, podendo ser utilizados 1, 2, 3 ou até mesmo os 4 módulos em simultâneo. Para cada módulo o comprimento máximo da resistência é de 550 mm, podendo no caso de usar os 4 módulos ir até ao comprimento máximo da prensa de 2200 mm.

Uma das grandes vantagens é que faz a grande diferença entre as duas prensas é que as resistências da prensa nova permitem o arrefecimento forçado. Para realizar esse processo, as resistências da prensa são construídas com um circuito hidráulico interno que terá a função de um permutador de calor. Estas são ligadas ao circuito de água da torre de arrefecimento e à rede de ar comprimido, ambas acionadas por electroválvulas. O ar terá apenas a função de limpar e esvaziar o circuito, ou seja, durante o processo de aquecimento das resistências, o circuito hidráulico não terá água em ebulição, evitando assim o sistema entrar em pressões elevadas.

As etapas de prensagem desta prensa são as indicadas na Figura 4.2 em que as designações T1, T2 T3, t1, e t2 são parâmetros que serão ajustados no capítulo 4.5.

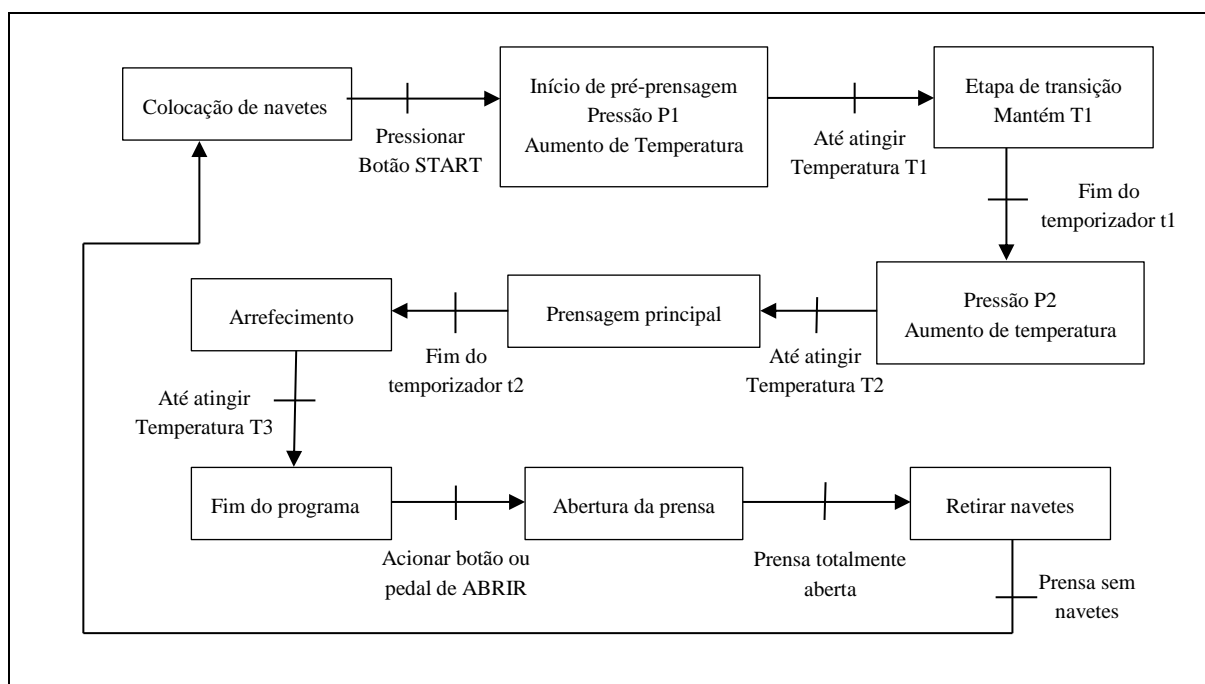


Figura 4.2. Etapas de funcionamento da prensa nova

4.3 Navetes para testes de prensagem

De maneira a poder dar seguimento à análise e comparação entre FRC isolado a 2 e a 3 camadas de fita de mica, foram usados os 18 tipos de FRC do capítulo anterior. Construíram-se navetes como se tratasse de um motor WEG, W22 355 ML; 6600V; Y; 1,3 MW; 50 Hz; 2P.

As navetes são de espiras duplas e as suas dimensões representadas na Figura 4.3.

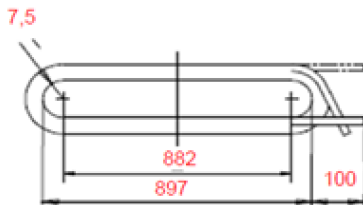


Figura 4.3. Recorte do plano de bobinagem- Dimensões da navete (em mm)

Na Figura 4.4 está representado um corte da ranhura do estator que ilustra a forma de alojar as bobinas. Uma vez que todo o FRC nesta análise tem a mesma largura (4,50 mm), os valores representados pela letra “e” (espessura) variam apenas com a espessura do isolamento (2, 3 ou 4 camadas).

A largura “l” da bobina vai variar com a espessura do FRC, espessura de isolamento e número de espiras da bobina, neste caso o número de voltas será diferente para as três espessuras de FRC, ou seja, para:

- FRC de 4,50 x 2,24 a navete terá 10 voltas
- FRC de 4,50 x 2,50 a navete terá 9 voltas
- FRC de 4,50 x 3,15 a navete terá 7 voltas

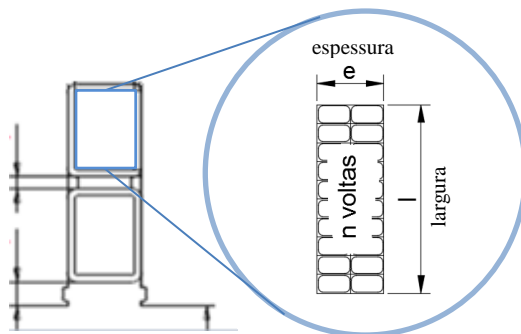


Figura 4.4. Recorte do plano de bobinagem - Dimensões da bobina no estator

Devido às prensas terem caixas de prensagem (Tabela 4.1) com dimensões diferentes, em cada ciclo serão prensados um conjunto de 5 navetes na prensa nova e 2 na prensa antiga, portanto para cada tipo diferente de fio de cobre serão produzidas 7 navetes para ensaios.

Com estas navetes pretendem-se testar processos com parâmetros diferentes em ambas as prensas e assim poder decidir qual a configuração melhor e verificar qual das prensas é mais vantajosa. Para tal serão efetuadas, antes e após prensagem, medições no sentido largura e espessura em 5 pontos diferentes de cada navete, conforme Figura 4.5, ou seja, 10 medições do lado superior e 10 medições do lado inferior da navete. A zona sombreada na figura representa a fita de resina.

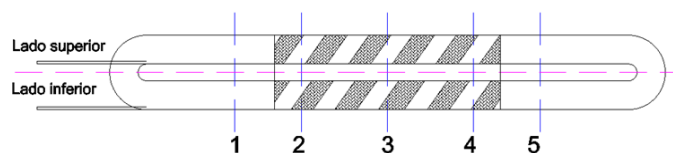


Figura 4.5. Pontos de medição dos testes de prensagem

As medições das navetes, antes e após prensagem, foram introduzidas em folha de cálculo de Excel (exemplo apresentado na Figura 4.6) onde é calculada a correspondente redução em cada ponto de medição. Dos 5 valores de redução é calculada uma média e obtido um valor percentual quando comparado com a espessura do isolamento do FRC em questão (espessura de isolamento determinado na secção 3.5.2 deste relatório).

Para cada linha de dados são analisados através de um gradiente, os valores medidos após prensagem em que o valor menor é assinalado a verde e o valor maior a vermelho. Pretende-se com isto obter um padrão da zona da bobina onde geralmente se tem valores maiores e menores após prensagem.

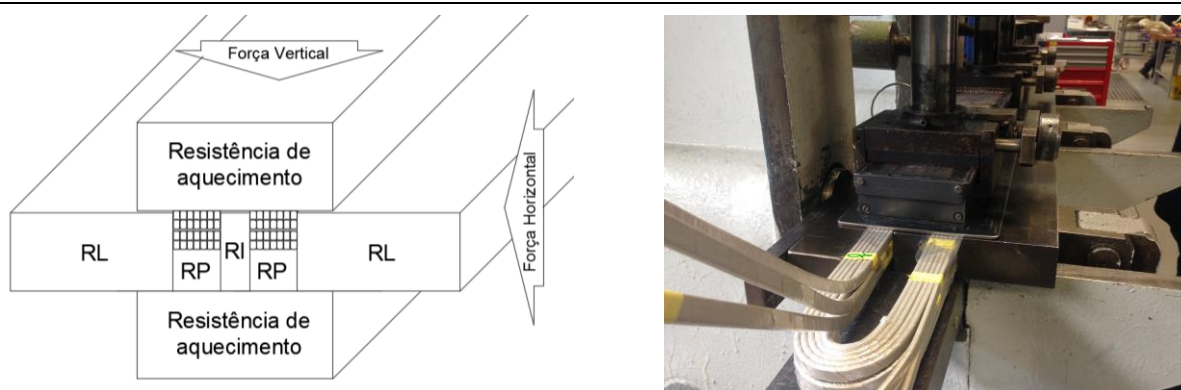
Fornecedor A												3 Fitas		4,50 x 3,15		Valores apresentados em mm										Medidas resultantes do ensaio de verificação dimensional Cap. 3.5.2.			
												Dimensões		FRC		Navete 7 voltas													
														l	e	e		l											
												Cobre nu	4,498	3,152	8,996		22,064												
												Acréscimo de isolamento	0,477	0,498	0,954		3,486												
												Cobre isolado		4,975	3,65	9,95		25,55											
												l = largura				e = espessura													
												Antes da prensagem					Depois da prensagem					Redução							
												1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	Média	%	
1												26,1	26,31	25,8	25,75	25,82	25,39	25,31	25,14	25,2	25,29	0,71	1	0,66	0,55	0,53	0,69	19,79	
												9,95	9,86	10,04	10,04	9,97	9,89	9,9	9,89	9,85	9,81	0,06	-0,04	0,15	0,19	0,16	0,104	10,90	
												25,93	26,03	25,86	25,8	26,16	25,4	25,11	25,25	25,14	25,49	0,53	0,92	0,61	0,66	0,67	0,678	19,45	
												9,87	9,98	10,04	10,05	9,99	9,82	9,8	9,83	9,79	9,82	0,05	0,18	0,21	0,26	0,17	0,174	18,24	
2																													
Até 7												Número da navete: 1 a 5 - Prensadas na máquina nova 6 e 7 - Prensadas na máquina antiga																	

Figura 4.6. Apresentação da folha de cálculo de controlo de prensagem

Como já visto anteriormente, uma boa prensagem tem como objetivo obter medidas uniformes ao longo da parte reta da navete. Para fazer essa verificação, é calculado individualmente para cada ponto de medição após prensagem, um desvio dimensional em relação à média dos cinco valores.

4.4 Preparar ferramentas de prensagem

Para além das resistências terão de ser utilizadas ferramentas tais como régua em aço que têm designações diferentes para ambas as prensas, as quais estão esquematizadas na Figura 4.7 e Figura 4.8.



RL – Réguas Laterais RP – Réguas de Prensar RI – Régua Interior

Figura 4.7. Esquematização das réguas da prensa antiga

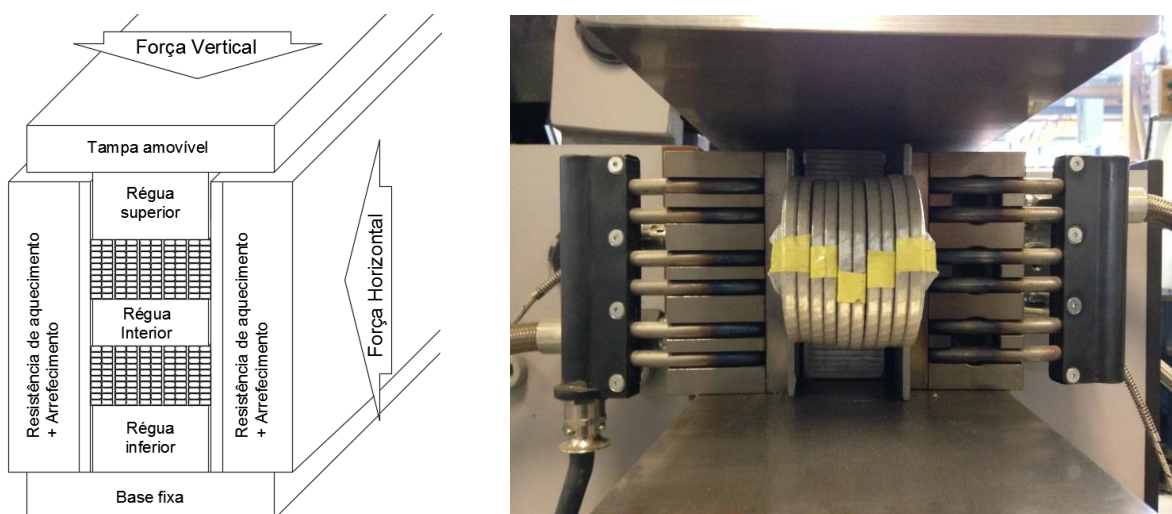


Figura 4.8. Esquematização das réguas da prensa nova

Para determinar as réguas apropriadas são utilizadas folhas de cálculo interligadas com o projeto do motor. São importados dados como dimensões do FRC com e sem isolamento, tipo de bobina, número de fios por espira e comprimento do estator. É calculada a largura e a espessura da navete considerando os resultados pretendidos da redução da prensagem. As características da Conductofol 2009 indicam que após prensagem térmica a fita de mica de 90 μm se reduz para $60 \pm 15 \mu\text{m}$. É com estes dados todos reunidos que são calculadas as réguas considerando uma folga mínima.

Atualmente utilizando a prensa Micafil está a ser considerado em projeto uma compactação no sentido da espessura da navete, não tendo redução, ou seja, mantendo a espessura da camada de isolamento em 90 μm . Na largura da navete para além da compactação considera-se que existe uma redução de camada de isolamento de 90 para 75 μm . Nos ensaios de prensagem que se seguem, será considerada para cálculo das réguas uma compactação e redução em ambos os sentidos da navete, pretendendo passar dos 90 para os 60 μm por camada de isolamento, e ainda uma folga extra para garantir que as réguas não façam de batente nas resistências, podendo assim ir ao limite de prensagem.

As Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam um exemplo de uma navete de FRC de 4,50 x 3,15 mm, isolada a 2 e 3 camadas respetivamente, com a diferença de dimensões do novo objetivo de prensagem.

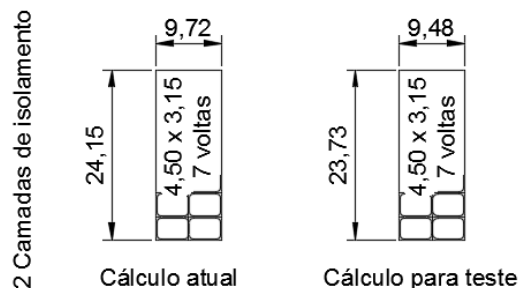


Figura 4.9. Exemplo de novo objetivo de prensagem de navetes - 2 camadas de isolamento

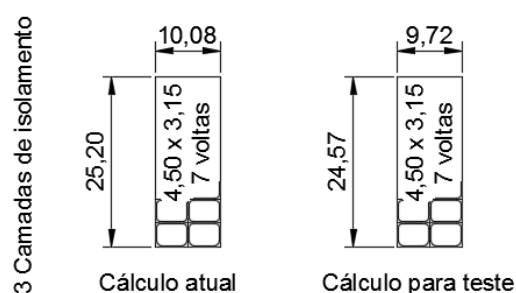


Figura 4.10. Exemplo de novo objetivo de prensagem de navetes - 3 camadas de isolamento

Pode-se observar que se estes valores forem atingidos, a otimização da prensagem térmica da navete com FRC isolado a 3 camadas terá uma espessura (9,72 mm) equivalente ao processo de prensagem atual em navetes para as quais já tenha sido aprovado a substituição do FRC a 2 camadas.

Tentando compactar mais e ir para além do processo de prensagem atual, estas novas dimensões pretendidas nas navetes fazem com que as réguas tenham medidas diferentes das calculadas atualmente em projeto. Foram portanto fabricadas na secção de ferramentaria novas réguas de forma a conseguir obter os resultados pretendidos.

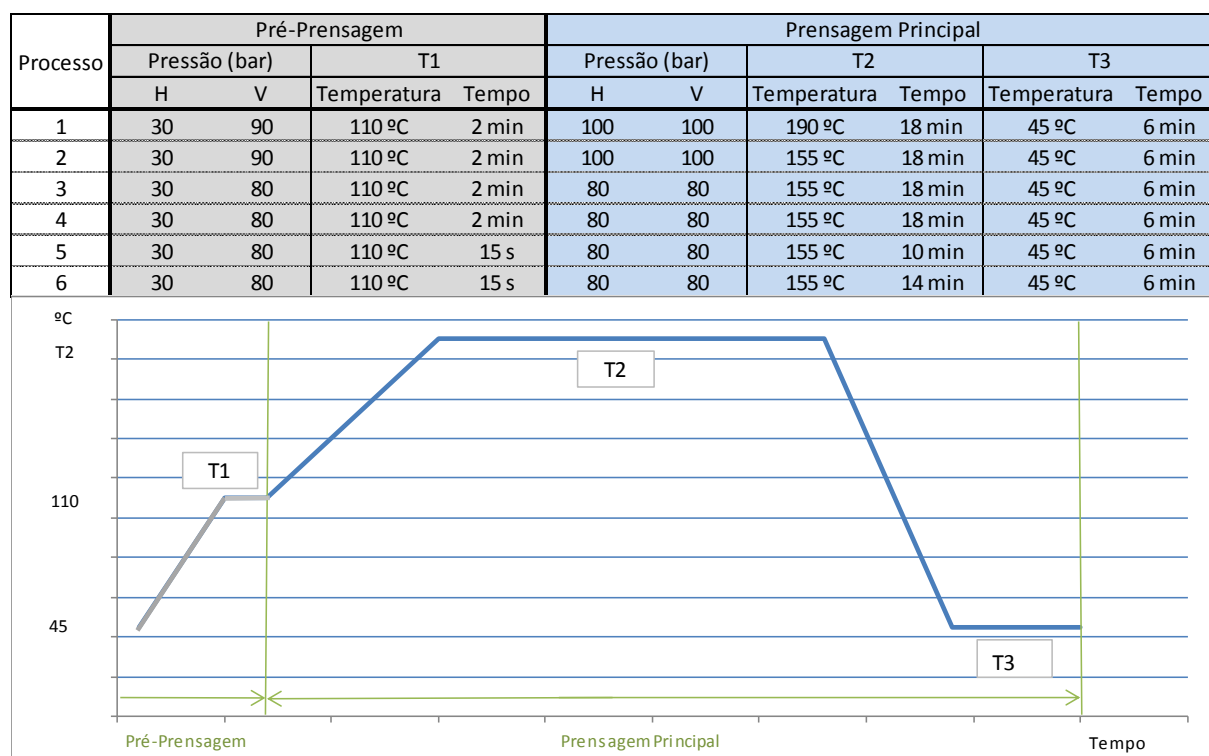
4.5 Processos diferentes de prensagem

Para otimizar o processo de prensagem foram testados 6 processos diferentes em que foram colocadas em ambas as prensas os mesmos parâmetros, temperaturas e tempos. A afinação de pressão apenas é possível na prensa nova, pelo que a prensa antiga tem pressão na pré-prensagem de 30 % e no ciclo principal com pressão máxima 100 %.

Tendo pressões, tempos e temperaturas elevadas, começou-se por manter os parâmetros de fábrica da prensa nova e utilizá-los como configuração do primeiro processo. Antes de tomar decisão dos parâmetros dos processos seguintes, foram medidas as navetes e comparados os resultados. Entre processos, apenas se varia um dos três parâmetros, pressões, temperatura ou tempos. Assim, foi-se verificando se os objetivos de prensagem estavam a ser atingidos ou se teriam diferenças notáveis, conseguindo perceber o impacto dos diferentes fatores: tempo, temperatura e pressão.

Ao longo dos testes foram-se ajustando os parâmetros conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Parâmetros de teste de diferentes processos de prensagem



Em cada processo diferente de prensagem foi usado o cobre dos 3 diferentes fornecedores variando entre processos a medida do FRC com que foram enroladas as navetes, com a sequência indicada na Tabela 4.3. Assim sendo, é repetido o ensaio com os mesmos parâmetros 3 vezes e é possível comparar o cobre dos 3 fornecedores. É de voltar a referir que em cada ciclo de prensagem da máquina nova é utilizado um conjunto de 5 navetes e na máquina antiga um conjunto de 2 navetes.

Tabela 4.3. Sequência de navetes nos diversos processos

Processo	FRC das navetes	Isolamento
1	4,50 x 3,15	3 Camadas
2	4,50 x 2,50	3 Camadas
3	4,50 x 2,24	3 Camadas
4	4,50 x 2,24	2 Camadas
5	4,50 x 2,50	2 Camadas
6	4,50 x 3,15	2 Camadas

4.5.1 Processo 1

Na prensa nova, verificou-se a importância em ajustar e fechar simultaneamente ambos os eixos, horizontal e vertical, antes de iniciar o programa em modo automático, isto para evitar que uma espira das navetes junto às resistências ficasse entalada na folga das régua.

Com a prensagem deste processo, as navetes junto às resistências apresentavam uma tonalidade mais escura em ambas as prensas e marcas das extremidades das régua na prensa nova. Devido a esta tonalidade escura, sinal de início de degradação da mica, resolveu-se ao passar para o processo 2 reduzir a temperatura T2.

É ilustrado na Figura 4.11, o resultado do aperto de uma espira na folga das réguas e a marca deixada pelas extremidades destas no isolamento das navetes.



Figura 4.11. Exemplo de dois problemas verificados no processo 1 de prensagem

4.5.2 Processo 2

Ao reduzir a temperatura de prensagem principal, melhorou-se o aspeto das navetes. Estas não apresentavam o tom escurecido (verificado no processo 1), contudo continuavam-se a verificar marcas das extremidades das réguas.

Ao concluir este processo, decidiu-se bolear os topos das réguas de maneira a suavizar as arestas e decidiu-se também aliviar as pressões de prensagem, uma vez que estas estavam no máximo.

4.5.3 Processo 3

Reduzindo as pressões de prensagem resolveram-se os problemas das marcas deixadas pelas réguas no isolamento das navetes. As navetes apresentaram-se sem danos visíveis, e a fita de resina fundiu-se corretamente nas espiras conformando a navete.

Como a qualidade do produto é o ponto mais importante e não pode ser posto em causa, esta configuração de parâmetros é a primeira a poder ser aprovada e os seus resultados serviram de referência, tentando estes serem mantidos ou melhorados nos processos seguintes.

4.5.4 Processo 4

Uma vez que a prensagem não estava a deixar marcas nem ferimentos no isolamento das navetes, decidiu-se manter os parâmetros de prensagem do processo 3 e utilizar as navetes com as mesmas dimensões de FRC (4,50 x 2,24 mm) no entanto isolado com 2 camadas de mica. Poderá ser analisado entre o processo 3 e 4, a diferença entre a utilização de FRC isolado a 2 e a 3 camadas de mica.

4.5.5 Processo 5

Do processo 4 para 5 reduziram-se os tempos de prensagem, passando o patamar de 2 minutos (etapa de transição na prensa nova) para 15 segundos, tempo suficiente para a prensa ajustar as pressões da prensagem principal e reduziu-se o tempo de prensagem principal de 18 para 10 minutos. Tendo a noção que esta foi uma grande redução nos tempos de prensagem, esta alteração serviu para testar qual seria o contributo do tempo na cura da prensagem.

Verificou-se que os resultados não foram positivos, pois a fita de resina não chegou a fundir corretamente (Figura 4.12), ficando mesmo uma saliência desta na própria navete. Algumas

espiras não estavam corretamente conformadas, conseguindo-se deslocar algumas fazendo força com a mão.

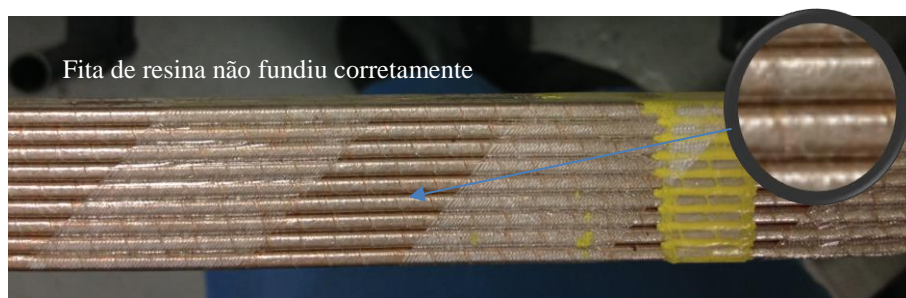


Figura 4.12. Exemplo do problema verificado no processo 5 de prensagem

4.5.6 Processo 6

Do processo 5 para 6 aumentou-se apenas o tempo de prensagem principal em 4 minutos. Esta diferença foi suficiente para resolver o problema verificado no processo 5. Pode-se constatar na Figura 4.13 que a resina existente na fita se fundiu e escorreu entre as espiras, o que permite uma boa conformação da navete e consequentemente da bobina final.



Figura 4.13. Exemplo de uma boa conformação de navete usando o processo 6

Com base nos resultados dos processos 5 e 6 foi analisado o comportamento térmico nas navetes utilizando sondas de temperatura do tipo PT100, conforme descrito no ponto 4.6.4.

4.6 Resultados

4.6.1 Comparação de processos

Da conjugação dos três pontos, tempo total de ciclo, medições dimensionais e qualidade de prensagem, o processo 6 foi o que teve melhores resultados mesmo quando comparados com processos mais agressivos como o processo 1 e 2 em que os danos causados inviabilizavam a utilização daqueles parâmetros (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Percentagens de redução dos 6 processos

Processo	Média da percentagem de redução	
	Largura	Espessura
1	21,16 %	18,17 %
2	12,46 %	14,97 %
3	13,50 %	14,44 %
4	11,71 %	14,97 %
5	15,29 %	4,04 %
6	19,35 %	14,15 %
Valor menor	24,10 mm	9,53 mm
Valor médio	24,27 mm	9,66 mm
Valor maior	24,56 mm	9,79 mm

Comparando o processo 6 com o processo 3, que tinha sido considerado como referência, mesmo tendo um tempo de prensagem inferior, este conseguiu apresentar melhor redução/compactação da largura da navete na ordem dos 6%, concluindo assim que deve ser encontrado um equilíbrio ótimo de parâmetros pois nem sempre mais é melhor.

Do processo 6 conclui-se que é possível ter uma boa prensagem de navetes e obter uma redução/compactação de 19% em largura e 14% na espessura das navetes.

Quando comparados os valores medidos com os objetivos de prensagem para dimensão de FRC em questão (Secção 4.4, Figura 4.9, valores para os quais foram calculadas as réguas), a espessura das navetes em nenhum caso atingiu o valor de 9,48 mm nem a largura o valor de 23.73 mm. Pelos valores médios e máximos pode-se concluir que a prensagem térmica não reduz a espessura do isolamento mas sim compacta e conforma as espiras.

4.6.2 Comparação de FRC isolado a 2 e a 3 camadas

Nas prensagens efetuadas, concluiu-se que o processo não reduz a espessura do isolamento. No entanto, utilizando FRC com menos uma camada de isolamento, as navetes terão dimensões menores. Comparando os processos 3 e 4, em que a única diferença é o número de camadas de isolamento do FRC, as medições (ver Tabela 4.5) apresentaram um valor médio de 1,59 mm na largura da navete e 0,29 mm da espessura. Sendo estas navetes de espiras paralelas com 10 voltas, esta diferença equivale à redução efetiva de uma camada de mica com uma espessura de 76 µm.

Tabela 4.5. Diferença entre o processo 3 e 4

Valores	Processo 3		Processo 4		Diferença entre processos	
	Largura	Espessura	Largura	Espessura	Largura	Espessura
Menor	26,61 mm	9,77 mm	25,09 mm	9,49 mm	1,52 mm	0,28 mm
Média	26,85 mm	9,87 mm	25,26 mm	9,59 mm	1,59 mm	0,29 mm
Maior	27,19 mm	10,01 mm	25,44 mm	9,71 mm	1,76 mm	0,31 mm

4.6.3 Comparação de prensas

Do resumo dos ensaios de prensagem, apresentado na Tabela 4.6, constatou-se que em média a prensa nova tem melhores resultados que a prensa antiga. Em termos de largura da navete, a prensa nova prensou quase o dobro e na espessura o quadruplo quando comparado à prensa antiga. Quanto à uniformidade das dimensões nos pontos de medição, embora pequena existe uma vantagem para a prensa nova.

Tabela 4.6. Resultados de comparação das duas prensas

Diferença Antes / Após Prensagem		Prensa	
		Nova	Antiga
Valor médio Antes da prensagem	Largura	25,17 mm	25,19 mm
	Espessura	9,71 mm	9,70 mm
Valor médio Após a prensagem	Largura	24,77 mm	24,98 mm
	Espessura	9,62 mm	9,69 mm
Total prensado	Largura	0,40 mm	0,21 mm
	Espessura	0,09 mm	0,02 mm
Média de desvios absolutos	Largura	0,066 mm	0,077 mm
	Espessura	0,044 mm	0,047 mm

Quanto à linearidade da parte reta das navetes, notaram-se diferenças notáveis quando comparadas as navetes prensadas na prensa nova e na antiga. As navetes da prensa nova são mais lineares enquanto que as navetes da prensa antiga têm uma forma mais ovalizada, podendo-se observar esta diferença na Figura 4.14.



Figura 4.14. Comparação de linearidade das navetes

Esta diferença terá a ver com o facto de que a prensa nova arrefece as resistências ainda com as navetes sobre pressão. Isto faz com que as navetes sejam retiradas da prensa a uma temperatura mais baixa, fazendo com que a resina já se tenha solidificado.

Para o processo de prensagem 6, o ciclo de prensagem de navetes na prensa antiga foi de 16 minutos e na prensa nova de 37 minutos, isto devido ao tempo necessária de aquecimento e arrefecimento das resistências. Na Tabela 4.7 é apresentada uma simulação de tempo necessário de prensagem de navetes de um motor de 48 bobinas. É necessário considerar para além do tempo utilizado pelo processo 6, tempo para colocar e retirar as navetes da prensa. O tempo de colocar e retirar navetes na prensa nova é mais demorado pois requer mais esforço e cuidado por parte dos operários. Somando estes tempos e o facto de que em cada ciclo de prensagem uma das prensas utilizar cinco navetes e a outra apenas duas, verifica-se que a prensa nova compete com a antiga, tendo mesmo assim no final da produção uma vantagem de 40 min.

Tabela 4.7. Cálculo de tempo de produção - exemplo para 48 bobinas

Máquina	Colocar bobinas (min)	Ciclo de prensagem (min)	Retirar bobinas (min)	Tempo de ciclo da máquina (min)	Nº bobinas / Prensagem	Nº bobinas / motor	Nº bobinas segurança / desperdício	Nº prensagens necessárias	Tempo total necessário (min)	Tempo total necessário (horas)
Nova	2	37	2	41	5	48	2	10	410	6,83
Antiga	1	16	1	18	2		2	25	450	7,50

4.6.4 Verificação da temperatura nas navetes

Uma vez que na prensa nova as navetes são agrupadas paralelamente em conjuntos, neste caso de 5 unidades, surgiu a necessidade de analisar e verificar a variação da temperatura da navete junto às resistências e da navete mais ao centro, que será o ponto mais afastado da fonte de calor.

Recorrendo a cinco navetes já prensadas, em duas delas foi efetuado um corte ao longo da parte reta, corte esse efetuado através de uma fresadora industrial e pelo qual vai ser possível passar os fios de ligação às sondas de temperatura do tipo PT100 (Figura 4.15). Uma das sondas será assim colocada a meio da primeira navete (junto à resistência) e a outra a meio da terceira, navete que se situa a meio das cinco, conforme Figura 4.16.

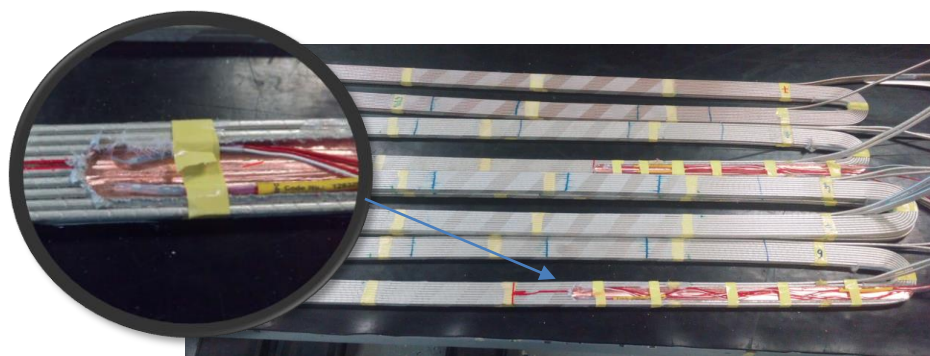


Figura 4.15. Corte efetuado nas navetes para colocação das PT100

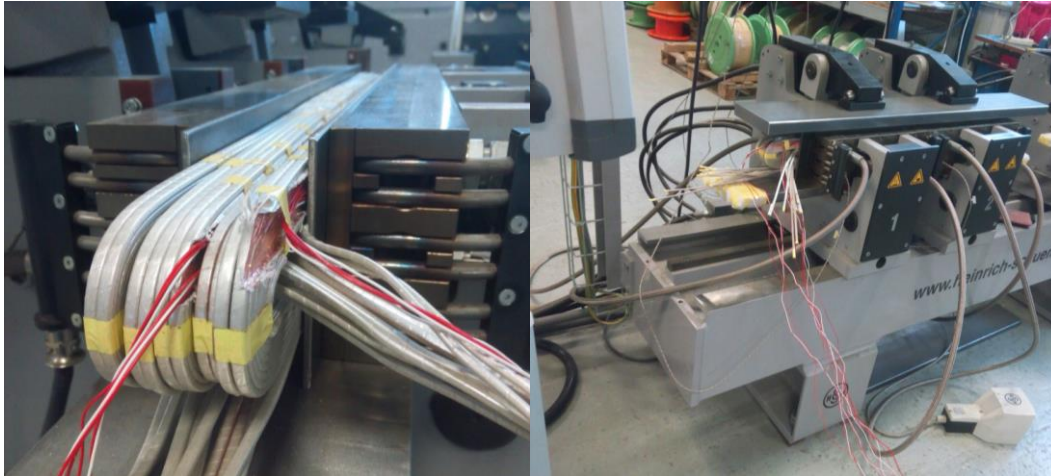


Figura 4.16. Colocação das navetes com duas PT100 na prensa nova

Para intervalo de temperatura de 0 a 850 °C, a característica da resistência ôhmica da PT100 é conforme a expressão (6).

$$R(\Omega) = PT * (1 + 3.90802 * 10^{-3} * T - 0.580195 * 10^{-6} * T^2) \quad (6)$$

Em que :
 R = Resistência em Ohm
 PT = Valor ôhmico da sonda a 0 °C = 100
 T = Temperatura a que se encontra a sonda

Deduzindo a equação (6) obtém-se a Temperatura em função da Resistência, equação (7), que é o que neste caso se pretende analisar.

$$T = \frac{-0.390802 \pm \sqrt{(-0.390802)^2 - 4 * (-0.580195 * 10^{-4} * (100 - R))}}{2 * (-0.580195 * 10^{-4})} \quad (7)$$

Repetindo o processo 6 com as navetes anteriormente preparadas e com cada sonda ligada a um multímetro digital, registou-se o valor de resistência apresentado a cada minuto de ciclo de prensagem bem como a temperatura indicada pela prensa. Utilizando a equação (7) obteve-se a temperatura equivalente às sondas e traçou-se o gráfico das três curvas equivalentes ao respetivo processo (Figura 4.17).

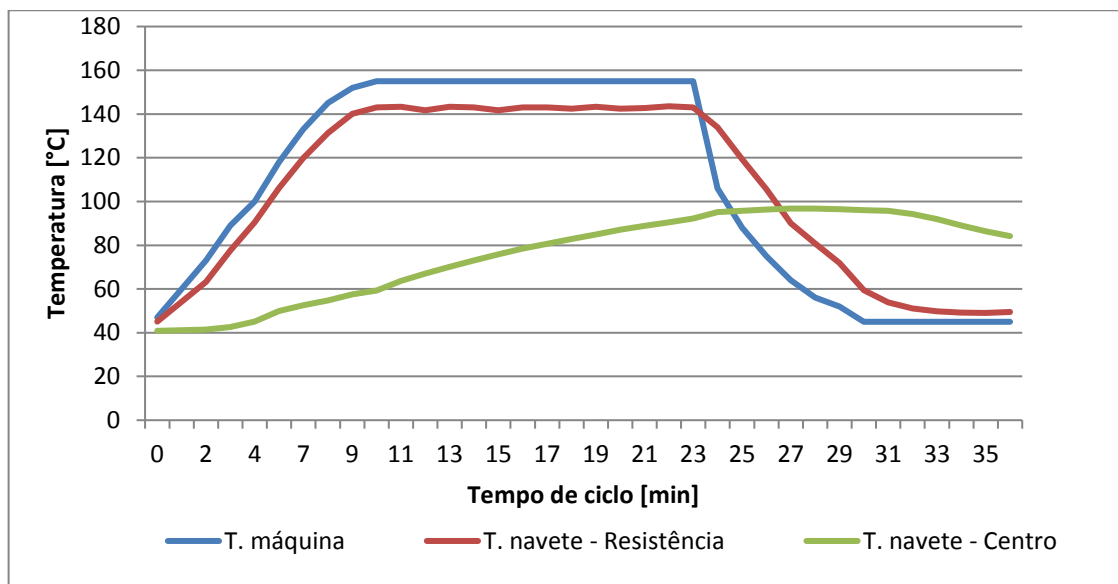


Figura 4.17. Curvas de temperatura relativa ao processo 6

É possível observar que a navete junto às resistências consegue acompanhar a variação da temperatura das resistências. No entanto, devido à massa de cobre e sobretudo à barreira térmica das várias camadas de isolamento, a transferência de calor até a navete situada no centro do conjunto é mais lenta nunca atingindo valores de 100 °C.

Apesar do conjunto de navetes no ensaio de prensagem do processo 6 ter tido resultados aceitáveis e uniformes, colocou-se a questão ao fornecedor sobre a temperatura mínima da fita de resina. Tendo sido respondido por parte deste que a cura da resina só se dá a partir de 120 °C, teve-se a necessidade de reajustar os parâmetros de prensagem e repetir o ensaio com as sondas de temperatura.

A melhor opção encontrada foi aumentar em relação ao processo 6 a temperatura da etapa de prensagem principal para 170 °C durante 15 minutos. O traçado das três curvas está representado na Figura 4.18 em que se pode observar que a navete central esteve acima de 120 °C durante 13 minutos respeitando assim a indicação do fornecedor.

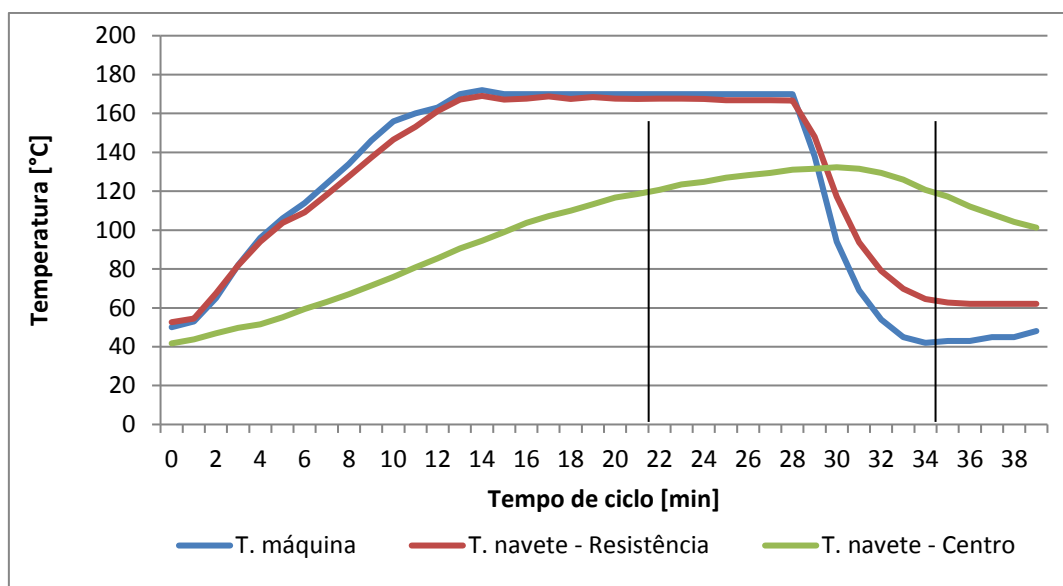


Figura 4.18. Curvas de temperatura relativa ao reajuste final do processo

4.7 Ensaio de rigidez dielétrica entre espiras

Este ensaio consiste em aumentar a tensão entre espiras adjacentes até à rutura do isolamento. Assim, será testada a capacidade de isolamento entre espiras dos 18 tipos de FRC usado ao longo deste relatório tanto nas navetes como em bobinas. Uma vez que a rutura do isolamento ocorrerá no ponto mais frágil, teoricamente em curvaturas, poderá ser assim analisado se esse ponto frágil passou a ser na área prensada, fruto de uma prensagem excessiva ou incorreta.

Preparação do ensaio

Dos 6 processos diferentes de prensagem em que em cada um havia três prensagens de navetes de fornecedores diferentes, foram recolhidas 2 navetes de cada conjunto, em que uma delas foi expandida em máquina e formada uma bobina seguindo a sequência de etapas de produção. Estas duas navetes dos 18 conjuntos de prensagens formam assim 18 navetes e 18 bobinas às quais irão ser efetuadas ensaios de rigidez dielétrica entre espiras.

Todas estas navetes e bobinas tiveram de ser cortadas do lado das ligações, as pontas afastadas e os terminais decapados, à semelhança da Figura 4.19 para navetes e Figura 4.20 para as bobinas, de modo a poderem ser ligados os terminais do aparelho de ensaio.

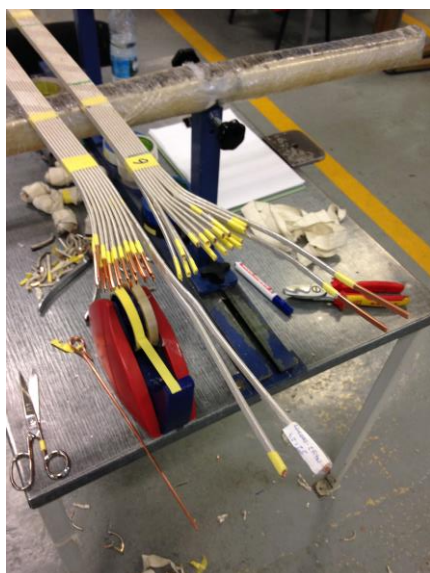


Figura 4.19. Preparação da navete para ensaio de rigidez dielétrica entre espiras

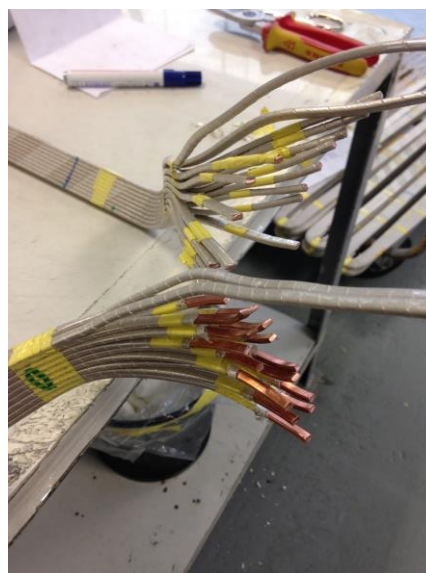


Figura 4.20. Preparação da bobina para ensaio de rigidez dielétrica entre espiras

Descrição de ensaio

À semelhança do ensaio de rigidez dielétrica de provetes na secção 3.5.4, o aparelho de ensaio é configurado do mesmo modo com uma rampa de subida da tensão de 500 V/s e uma tensão de ensaio de 25 kV. Esta tensão é bastante acima da tensão de rutura esperada de forma a garantir que a tensão aumente até romper o isolamento, ocorrendo um curto-circuito fase neutro com uma corrente limite de 5 A.

Uma vez que as navetes estão cortadas, os terminais do aparelho são ligados em duas espiras abertas, da navete ou da bobina, conforme a Figura 4.21, em que as espiras ensaiadas (representadas com preenchimento laranja) são intervaladas, isto porque a disrupção de um ensaio pode afetar o isolamento das espiras vizinhas.



Figura 4.21. Indicação das espiras para ensaio de rigidez dielétrica

As partes metálicas dos terminais do aparelho de ensaio foram isoladas com tubo de tela com boas características de isolamento, para evitar o arco elétrico entre ambos devido à sua proximidade e diferença de potencial. Ao ensaiar duas espiras adjacentes verificou-se que era necessário isolar as pontas das restantes espiras, pois durante o ensaio em corrente alternada, eram induzidas tensões em espiras próximas chegando a criar arco elétrico entre elas.

Resultados

Foram registados os valores de tensão máxima entre espiras e anotada a zona da navete/bobina em que ocorreu a disrupção de isolamento. Foram invalidados os resultados nas situações em que a disrupção se tenha dado muito próximo da disrupção de outras espiras, pois poderá ter sido fragilizado o isolamento. Foram igualmente invalidados aqueles que tenham ocorrido logo junto aos terminais do aparelho de medição ou nas pontas que foram abertas, afastadas e/ou isoladas. Dois destes casos poderão ser visualizados na Figura 4.22.

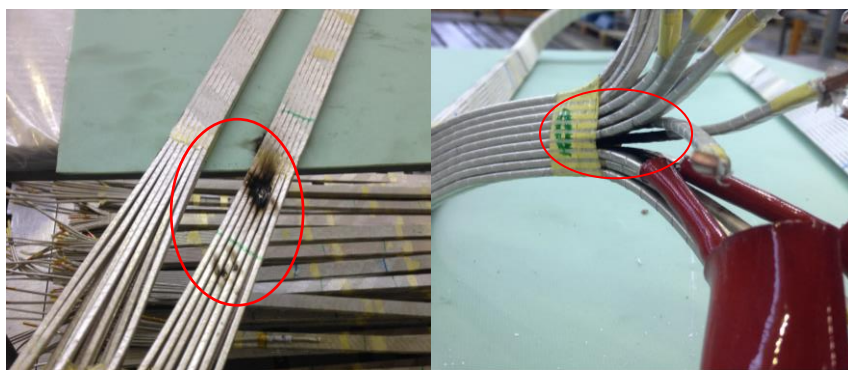


Figura 4.22. Exemplo de invalidação de resultados

Como a amostra de apenas uma navete e uma bobina não era suficiente para criar uma média de comparação entre processos de prensagem, juntou-se por fornecedor as três medidas diferentes de FRC, tanto para navetes como para bobinas, comparando assim os resultados entre navetes e bobinas constituídas por FRC isolado por duas e por três camadas de mica (Tabela 4.8).

Tabela 4.8. Resultados de rigidez dielétrica entre espiras

Camadas de isolamento do FRC	Navetes		Bobinas	
	2	3	2	3
Valor mínimo registado	7,32 kV	9,64 kV	6,74 kV	8,14 kV
Valor médio dos ensaios	8,84 kV	11,99 kV	8,75 kV	10,33 kV
Valor máximo registado	10,08 kV	13,81 kV	10,37 kV	12,60 kV

Os resultados são maiores que no ensaio de rigidez dielétrica de provetes, pois entre espiras encontram-se duas vezes o número de camadas de isolamento do FRC. Verifica-se que a capacidade de isolamento da navete depois de ser formada, ou seja da bobina, no geral é menor, fazendo-se sentir mais nas navetes de FRC isolado a 3 camadas. Em relação às bobinas constituídas por FRC isolado com 2 camadas de mica o valor mínimo registado de todos os ensaios de rigidez dielétrica entre espiras foi de 6,74 kV. Embora a tensão nominal entre espiras de uma bobina seja igual à tensão nominal da bobina a dividir pelo número de espiras, no primeiro pico de arranque do motor, quando ligado diretamente à rede de MT, toda a tensão é aplicada à primeira espira. Nesse momento pode existir entre as duas primeiras espiras da bobina toda a diferença de potencial, ou seja, para motores de 6,6 kV, podem estar presentes $6,6/\sqrt{3}$, isto é aproximadamente 3,81 kV, pois o motor é sempre ligado em estrela. No caso das bobinas constituídas por FRC isolado a 3 camadas de mica, que tem aplicação em motores de AT até 13,8 kV, essa tensão será de $13,8/\sqrt{3}$ ou seja aproximadamente 7,97 kV. Para ambas as situações, os valores médios dos ensaios efetuados e até mesmo o valor mínimo registado foram superiores a essas tensões estipuladas, tanto para FRC isolado a 2 como a 3 camadas de mica.

A zona onde ocorreram com mais frequência as disrupções foi na curva oposta às ligações, pois devido à curvatura e à torção do fio de cobre, o isolamento sofre muito esforço mecânico. Em nenhum caso a disrupção ocorreu entre espiras na zona prensada, ou seja, nenhum processo de prensagem causou danos no isolamento das navetes e produção de bobinas.

5 Conclusões e Propostas de Desenvolvidos Futuros

5.1 Conclusões

Do estudo e ensaios realizados durante este estágio obteve-se uma avaliação do processo atual de fabrico de bobinas de MT em que se verificou a importância do controlo de qualidade do produto adquirido, neste caso do FRC isolado com três camadas de fita de mica. Em relação à avaliação da substituição para as duas camadas de fita de mica, esta foi aprovada apresentando bons resultados para o método construtivo do fornecedor B, podendo ser utilizado em produção de bobinas de motores de indução trifásicos de MT, trazendo como benefício núcleos das bobinas mais compactos e um benefício económico considerando o consumo de cobre do ano de 2017 em mais de 23.800 €. Foi também desenvolvido um Guia de Ensaios (em anexo) servindo para consulta e aprovação de novos fios condutores, com os mesmos ou diferentes métodos construtivos ou com diferente isolamento.

Quanto à prensagem térmica, esta teve uma nova configuração de parâmetros e uma nova atualização com a entrada em funcionamento de uma nova prensa térmica. Esta trouxe vantagens, melhorando a qualidade da bobinagem, com bobinas compactas, bem conformadas, retas uniformes e alinhadas com a ranhura do estator. Esta nova prensa consegue manter a produção de prensa antiga ou duplicando a produção se forem mantidas ambas as prensas em funcionamento.

5.2 Trabalho Futuro

Dos bons resultados apresentados na avaliação da substituição de FRC isolado a três camadas de mica para as duas camadas, foi aprovado o método construtivo do fornecedor B. Não podendo ficar apenas dependente de um fornecedor serão contactados os fornecedores A e C, aos quais será requisitada uma amostra com o mesmo método construtivo, ou seja, uma fita sobreposta a 50% resultando em duas camadas de isolamento. Estas serão sujeitas aos mesmos ensaios apresentados neste relatório.

Em relação à prensagem térmica, utilizando a prensa nova, esta terá de ser acompanhada na fase inicial, reajustando se necessário os parâmetros do processo para diferentes tamanhos de navetes, dando formação aos colaboradores da linha de produção e reforçando o controlo de qualidade assegurando assim o correto funcionamento da máquina e do processo de produção.

Num estudo posterior será avaliado o processo de fabrico da bobinagem a seguir à prensagem térmica e avaliado a utilização de outros materiais isolantes no isolamento principal ou acabamento final.

Será conveniente ensaiar uma bobina formada (sem estar cortada) com ensaio de onda-choque (ensaio por impulsos injetados em toda a bobina) em que por repetição será aumentada a amplitude da onda até à rutura do isolamento. É assim ensaiado o limite de transitórios e picos de tensão.

Bibliografia

- Afonso, J. M. (2014). *Ensaio de motores elétricos*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores: Universidade de Coimbra.
- Almacinha, J. A. (2013). *Introdução ao Conceito de Normalização em Geral e sua Importância na Engenharia*. U.Porto - FEUP e INEGI.
- APTA - Associação de Produtores de Tubos de Aço. (s.d.). *Documentos de inspeção*. Obtido em 20 de 10 de 2017, de <http://www.apta.pt/conteudos.php?idConteudo=278>
- Catálogo WEG. (2014). Transformando energia em soluções. *Isto é WEG*, 5-6.
- Marcon, V. (s.d.). *Sistema de Teste em Estatores Bobinados*. Seção de Metrologia – WEG S.A.
- PILZ - The Spirit of Safety. (s.d.). *Normas internacionais e nacionais*. Obtido em 20 de Outubro de 2017, de <https://www.pilz.com/pt-BR/knowhow/law-standards-norms/standards/iso-iec-standards>
- Rodrigues, A. L. (2010). *Estudo comparativo de sistemas de isolamento em motores MT*. Jaraguá do Sul: FEUP e FURB.
- IEC 60851-2 - Winding wires - test methods - part 2: determination of dimensions.
- IEC 60317-0-2 - Specifications for particular types of winding wires - part 0: general requirements - section 2: enameled rectangular copper wire.
- IEC 60317-27 - Specifications for particular types of winding wires - part 27: paper tape covered rectangular copper wire.
- IEC 60851-5 - Winding wires - test methods - part 5: electrical properties.
- IEC 60317-0-4 - Specifications for particular types of winding wires - part 0-4: general requirements - glass-fiber wound, resin or varnish impregnated, bare or enameled rectangular copper wire.
- WPS-2828 PT - Fio de cobre de seção retangular esmaltado ou não isolado com fita de mica e poliéster ou kapton.
- WPS-4626 PT - Ensaio em fio de cobre retangular esmaltados ou não recobertos com mica.
- WPS-5065 PT - Fio de cobre nu de secção retangular.
- WPS-22500 PT - Sistema samicabond isolamentos.
- WPS-22513 PT - Fabrico de bobinas em fio de cobre retangular.

Anexo A – Ficha técnica – Conductofol 2009

Anexo B – Guia de Ensaaios